علم الكيمياء

الجزء الثاني

الدكتور

محمد إسماعيل علي الدرملي

دار العلم والإيمان للنشر والتوزيع

دار الجديد للنشر والتوزيع

540

ا. م

محمد اسماعيل علي الدرملي ، .

علم الكيمياء ج2 / محمد اسماعيل علي الدرملي .- ط1.- دسوق: دار العلم والإيمان

للنشر والتوزيع، دار الجديد للنشر والتوزيع .

352 ص ؛ 17.5 × 24.5سم .

تدمك : 978 – 977 – 308 – 620 - 6

1. الكيمياء.

أ - العنوان .

رقم الإيداع : 28012 .

الناشر : دار العلم والإيمان للنشر والتوزيع

دسوق - شارع الشركات- ميدان المحطة – بجوار البنك الأهلي المركز

elelm_aleman@yahoo.com & elelm_aleman2016@hotmail.com E-

:mail

الناشر : دار الجديد للنشر والتوزيع

تجزءة عزوز عبد الله رقم 71 زرالدة الجزائر

E-mail: dar_eldjadid@hotmail.com

2018

الفهـــرس

الفصل الثاني عشر

إرهاصات ميكانيكا الكم

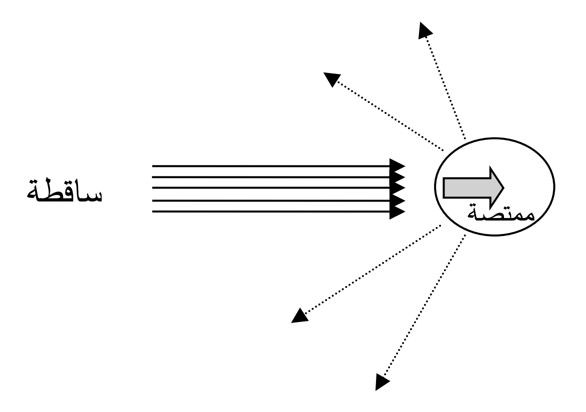
في نهاية القرن التاسع عشر كان علم الفيزياء قد تطور تطوراً عظيماً من الناحية النظرية. فمن جهة، كانت هناك قوانين نيوتن في علم الميكانيك والتي استطاعت أن تحقق نجاحاً باهراً في تفسير حركات الأجسام ووصفها، ومن جهةٍ أخرى كانت هناك معادلات ماكسويل والتي تمثل الأساس النظري لعالم الكهرباء والمغناطيسية. كان العلماء على قناعة تامة بأنّ النظرية الكونية الشاملة، والتي يفترض فيها أن تفسر كلّ ما يحدث أو يشاهد في كوننا، قد أصبحت بالفعل في متناول الأيدي، وأنّ مسألة كشف ما زال مجهولاً من حقائق إنّما هي مسألة زمن وأنّه سرعان ما ستتّضح وتنقشع غمامة الجهل بالتطبيق المناسب للأسس المعرفية المتمثلة آنذاك بميكانيكا نيوتن ومعادلات ماكسويل أو ما يسمّى بالفيزياء التقليدية.

إلاّ أنّ الأرض بدأت تتزلزل تحت أرجل الفيزياء التقليدية التي أظهرت عجزاً وفشلاً بالغين أمام بعض الظواهر والتي بدت أول الأمر تافهة وسخيفة، وأصبح من الواضح أنّ ما كان يعتبر من المسلمات في الفيزياء التقليدية بحاجة إلى مراجعات جذرية. وسنعرض فيما يلي إلى بعضِ من هذه المآزق التي غيّرت مسرى علم الفيزياء.

إشعاعات الجسم الأسود:

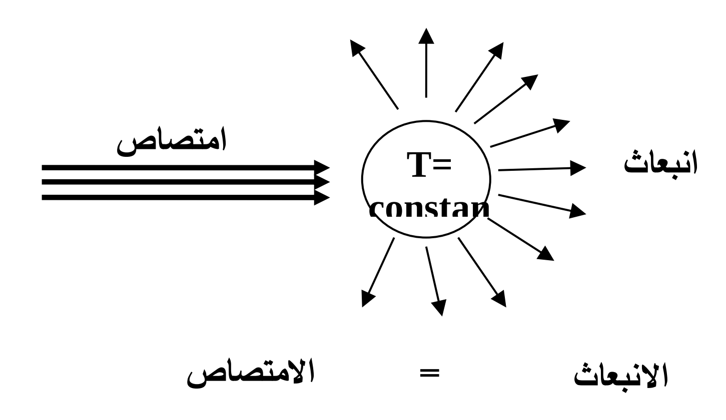
تأمّل في جسم تسقط عليه أشعة ما. ما مصير الأشعة الساقطة على هذا الجسم؟ هناك احتمالان لا ثالث لهما: إمّا أن تنعكس هذه الأشعة مرتدّة عن ذلك الجسم أو أن يمتصّها الجسم مستفيداً منها في رفع طاقته وزيادة درجة حرارته. في واقع الأمر فإنّ كلا الأمرين يحدثان معاً: جزء من الأشعة ينعكس والجزء الآخر يتم امتصاصه، و تختلف الأجسام بعضها عن بعض في نسبة ما ينعكس إلى ما يُمتصّ، فبعضها يمتص الكثير ولا يعكس إلاّ القليل وبعضها يمتص القليل ويعكس الكثير وبعضها يتقارب فيها الجزءان المنعكس والممتص من حيث كميتهما...الخ.

أمّا من الناحية المثالية فنميّز بين حالتين على طرفي نقيض. الحالة الأولى عندما يعكس الجسم كلّ الأشعة الساقطة عليه، في مثل هذه الحالة يدعى هذا الجسم بالعاكس التام. أمّا إذا كان الجسم يمتص جميع الأشعة الساقطة عليه فيسمّى بالجسم الأسود. وهنا نتذكّر ما تعلّمناه في المدرسة من أن الجسم ذا اللون الأسود هو الذي يمتص جميع الأشعة الضوئية المرئية الساقطة عليه فلا ينعكس إلى العين ولا يصل إليها شيء من هذه الأشعة فتظهر سوداء (تذكّر ابن الهيثم).



بامتصاص الأشعة الساقطة تزداد درجة حرارة الجسم ويزداد تبعاً لذلك انبعاث الأشعة من الجسم، فكلّ جسم له درجة حرارة أكبر من الصفر المطلق فإنّه يقوم بإصدار أشعة تحمل جزءاً من الطاقة الكامنة في ذلك الجسم وتسمّى هذه العملية بانبعاث الأشعة. لاحظ أنّ عملية الانبعاث مختلفة تماماً عن عملية الانعكاس، ففي الحالة الأولى يستفيد الجسم من الأشعة الساقطة عليه في رفع طاقته ثمّ يقوم بالتخلّص من الطاقة الزائدة عن طريق بعث أشعة تصدر عنه، أمّا في حالة الانعكاس فلا تدخل الأشعة الجسمَ أصلاً. وعلى هذا، فإنّ الجسم الأسود يمتص جميع الأشعة الساقطة عليه كما أنّه تنبعث من الجسم الأسود أشعة بناءَ على درجة حرارته.

عادةً، عندما نتكلم عن الجسم الأسود نقصد الجسم الأسود في حالة الاتزان وهي الحالة التي تكون فيها كمية الطاقة الساقطة على الجسم ويتمّ امتصاصها مساوية لكمية الطاقة المنبعثة من الجسم وتكون بذلك درجة حرارة الجسم ثابتة. في حالة الاتزان هذه يكون مقدار الانبعاث أكبر ما يكون، أمّا الأطوال الموجيّة للأشعة المنبعثة فتأخذ كلّ القيم الممكنة من 0 ⟵∞، وهو أمر بديهي حيث أنّ الجسم الأسود يمتص جميع الأشعة الساقطة عليه مهما كان طولها الموجي.



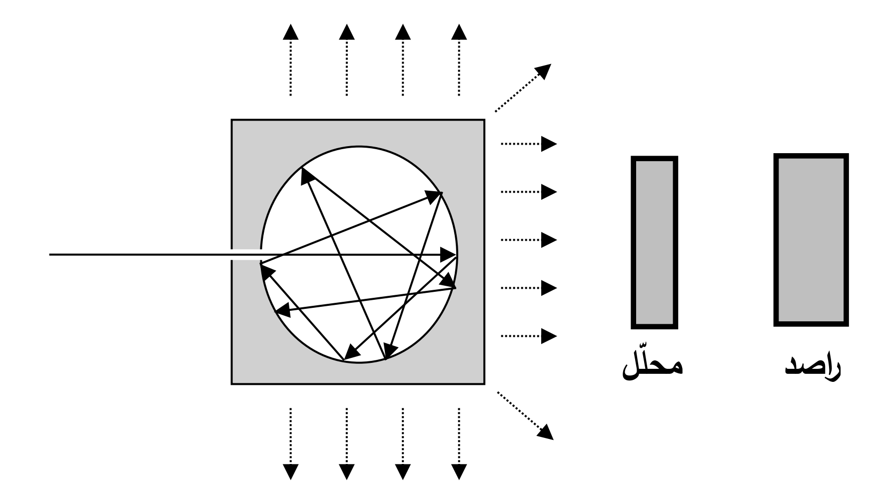
هل يوجد الجسم الأسود في عالمنا الحقيقي؟

لم يتمّ العثور حتى الآن على جسم يمتص كلّ الأشعة الساقطة عليه، وربّما يكون الكربون بشكله الجرافيتي الأقرب إلى حالة الجسم الأسود

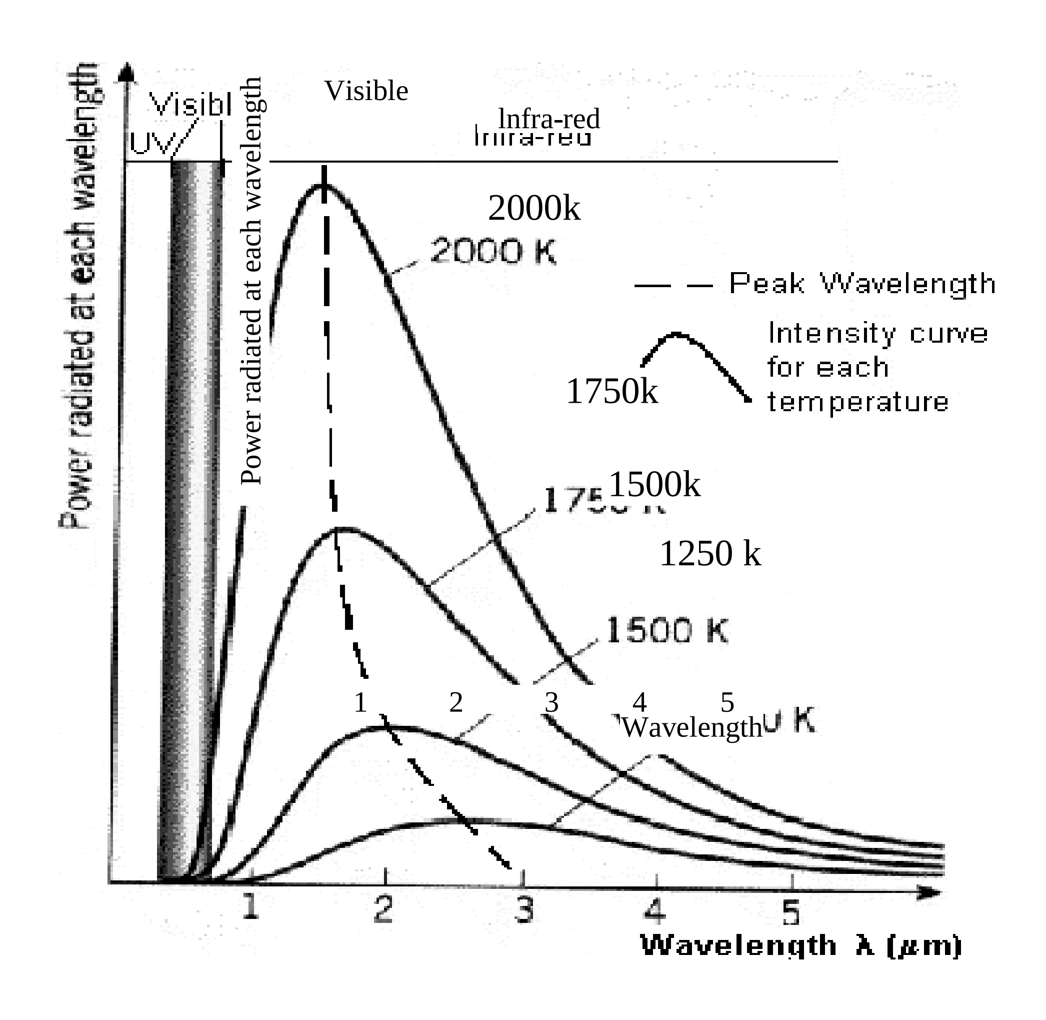
حيث أنّه يمتص حوالي 97 % من الأشعة الساقطة عليه.أمّا بالنسبة للأشعة المنبعثة من الأجسام التي درجة حرارتها أعلى من الصفر المطلق (لمبة صفراء، قطعة حديد ساخنة، الشمس، النجوم، جسم الإنسان) فهي تشبه إلى حدٍّ بعيد تلك المنبعثة من الجسم الأسود من حيث توزيعها كما سيأتي، بل إنّ أشعة الميكرويف الكونية الموجودة كخلفية في كوننا الواسع والتي يعتقد أنّها من بقايا الانفجار العظيم الذي نتج عنه الكون زماناً ومكاناً تدخل أيضاً في هذا الباب حيث أمكن بواسطتها تحديد درجة حرارة الكون.

ويمكن من الناحية العملية عمل نموذج للجسم الأسود على النحو التالي:

تصوّر وجود تجويف، كما في الشكل أدناه، ليس له سوى فتحة ضيقة وحيدة تصله بالخارج. يمثّل الشعاع الداخل إلى التجويف عن طريق هذه الفتحة الشعاع الساقط على الجسم الأسود. سيدخل هذا الشعاع، بغض النظر عن طوله الموجي، وسيظلّ ينعكس على السطح الداخلي في هذا التجويف ممّا يجعل احتمال خروجه ضئيلاً جدّاً جدّاً. إذاً، الشعاع الساقط يدخل داخل الجسم ولا يخرج منه وهذا يمثّل حالة امتصاص جميع الأشعة الساقطة على الجسم الأسود بغض النظر عن طولها الموجي دون أن ينعكس أي جزء منها.



بعد فترة وجيزة يصل الجسم ذو التجويف إلى حالة اتزان بحيث تكون الطاقة المنبعثة مساوية للطاقة الداخلة، ويتم معرفة فيما إذا كان الجسم قد وصل فعلاً إلى حالة الاتزان عن طريق قياس درجة حرارته والتي تصبح ثابتة لا تتغير عند الوصول إلى حالة الاتزان. عن طريق رصد الأشعة المنبعثة من الجسم يمكن تحديد القدرة الإشعاعية لهذا الجسم والتي تساوي كمية الطاقة التي يشعّها الجسم في وحدة الزمن ووحدتها J/s كما يمكن تحديد توزيع هذه القدرة على الأطوال الموجية المختلفة حيث يتم تحليل الأشعة المنبعثة بواسطة منشور مثلاً ثمّ ترصد الطاقة التي يحملها ذلك الشعاع ذو الطول الموجي المحدد. يمثّل الشكل أدناه توزيع القدرة الإشعاعية للجسم الأسود والتي تمّ تحديدها عملياً عند درجات حرارة مختلفة.


Visible
Infra-red
UV
Power radiated at each wavelength
2000k
2000 K
Peak Wavelength
Intensity curve
for each
temperature
1750k
1500k
1250 k
1500 K
1 2 3 4 5
Wavelength
1 2 3 4 5
Wavelength λ (μm)

نستطيع أن نستنتج من الرسم أعلاه الكثير من العلاقات المهمة:

بزيادة درجة حرارة الجسم الأسود تزداد قدرته الإشعاعية، P، (أي كمية الطاقة المنبعثة منه في الثانية الواحدة) والمتمثلة بالمساحة المحصورة بين المنحنى ومحور السينات. ولكن يلاحظ أن هذه الزيادة ليست خطية فارتفاع بسيط في درجة الحرارة يؤدي إلى زيادة كبيرة في القدرة الإشعاعية كما هو ملاحظ في الرسم. وقد استطاع العالم شتيفان أن يبين أنّ القدرة الإشعاعية تتناسب تناسباً طردياًّ مع القوة الرابعة لدرجة الحرارة وهو ما يعرف بقانون شتيفان (Stefan's law):

$P = \sigma A T^4$	P = Power radiated in W (J/s) القدرة الإشعاعية •• = Stefan's Constant 5.67 x 10-8 W m-2 K-4 ثابت شتيفان= A = Surface area of body (m^2) مساحة سطح الجسم T = Temperature of body (K) درجة حرارة الجسم

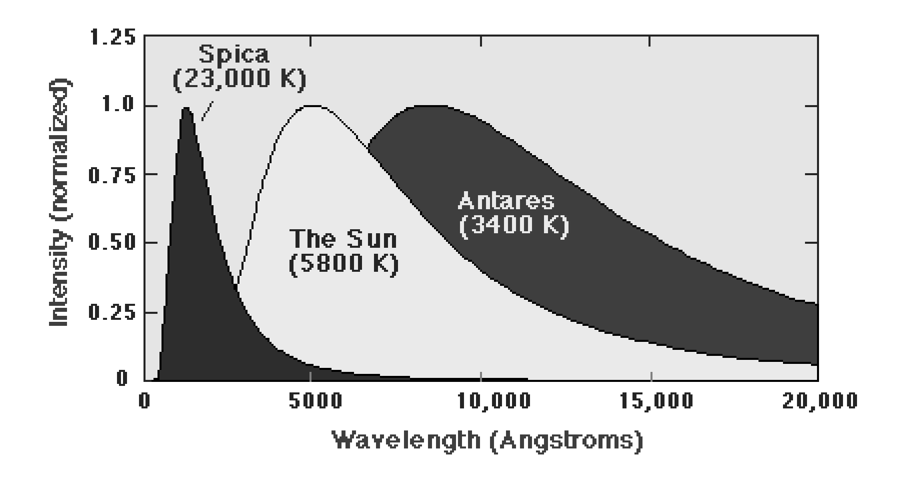
بزيادة درجة الحرارة تنسحب القيمة العظمى التي يمر خلالها المنحنى (maximum) إلى أطوال موجية أقصر، وهو ما يمثله الخط الأحمر المتقطّع في الرسم أعلاه. يرمز للطول الموجي الذي تقع عنده القيمة العظمى بالرمز λmax، وتكون الطاقة التي تحملها الأشعة المنبعثة ذات الطول الموجيλmax هي الأكبر بين سائر الأشعة ذات الأطوال الأخرى. وقد استطاع العالم ڤين (Wien) أن يستنبط العلاقة التجريبية التالية بين درجة حرارة الجسم وλmax والمعروفة بقانون ڤ ين:

<table>
<tr><td rowspan="3">•max.T =
constant</td><td>•max = Peak Wavelength (m)</td></tr>
<tr><td>T = SurfaceTemperature (K)</td></tr>
<tr><td>Constant = 2.898 x 10-3 mK</td></tr>
</table>

This rearranges to •max = 2.898 x 10-3 / T

ويتضح من المعادلة الأخيرة أنّه كلما ازدادت درجة الحرارة T كلما صغرت قيمة λmax. ويمكن استخدام هذه المعادلة في تحديد درجة حرارة الجسم وذلك عن طريق رصد الأشعة الصادرة منه ورسم توزيع الطاقة المنبعثة على الأطوال الموجية المختلفة (تماماً كما هو مورد في الرسم أعلاه) ومن ثمّ تحديد λmax وتعويضها في المعادلة المذكورة.

وهذه هي الطريقة المتبعة على سبيل المثال في تحديد درجة حرارة النجوم. ويوضح الرسم التالي لماذا تظهر بعض النجوم حمراء والأخرى صفراء وغيرها زرقاء، فالنجوم الزرقاء تمتاز بدرجة حرارتها العالية ممّا يجعل λmax تقع في مدى الأمواج المرئية عند اللون الأزرق. أمّا النجوم الباردة فتظهر حمراء لأنّ حرارتها منخفضة نسبياً فتكون أطول وتقع λmax عند اللون الأحمر في مدى الأمواج المرئية.

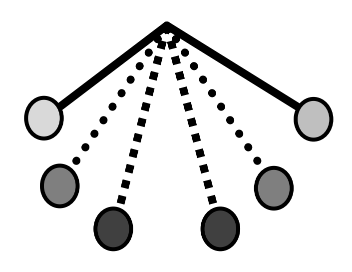


ويوضح الجدول التالي العلاقة بين λmax ودرجة حرارة الجسم الأسود:

Some Blackbody Temperatures			
Region	Wavelength (centimeters)	Energy (eV)	Blackbody Temperature (K)
Radio	> 10	< 10-5	< 0.03
Microwave	10 - 0.01	10-5 - 0.01	0.03 - 30
Infrared	0.01 - 7 x 10-5	0.01 - 2	30 - 4100
Visible	7 x 10-5 - 4 x 10-5	2 - 3	4100 - 7300
Ultraviolet	4 x 10-5 - 10-7	3 - 103	7300 - 3 x 106
X-Rays	10-7 - 10-9	103 - 105	3 x 106 - 3 x 108
Gamma Rays	< 10-9	> 105	> 3 x 108

نلاحظ من الجدول أنّ جسم الإنسان يشع أشعة ما تحت الحمراء وهي أشعة غير مرئية ولكن يمكن ملاحظتها باستخدام مناظير خاصة وهذا هو مبدأ المناظير تحت الحمراء التي تجد استخداماً لها في الأغراض العسكرية للتمكين من الرؤية الليلية حين تكون درجة حرارة جسم الإنسان أعلى من درجة حرارة المحيط الخارجي.

أصبح من اللازم الآن على الفيزيائيين أن يقوموا، بناءَ على الأسس النظرية الموجودة بين أيديهم، باشتقاق معادلة تصف منحنى توزيع القدرة الإشعاعية الذي تمّ الوصول إليه عن طريق التجربة. وقد تصدّى لهذه المسألة كلّ من العالمين ريلاي Rayleigh وجينز Jeans، حيث بَدَءا بطرح السؤال عن سبب انبعاث الأشعة واقترحا أنّ السبب هو وجود عدد لانهائي من المهتزات التوافقية داخل الجسم وبطاقات مختلفة. ولتوضيح هذه الفكرة نتأمّل في الرسم التالي:



يمثل الرسم بندولاً يهتز في ثلاث حالات تختلف عن بعضها في سعة الاهتزاز (البرتقالي الأكبر من حيث السعة والأزرق الأصغر). تسمى الحركة التي يقوم بها البندول حركة اهتزازية توافقية وهي نفس الحركة التي يهتز بها الجسم المربوط بنابض (زنبرك) بعد شدّه ثمّ إفلاته، وهي تشبه إلى حدٍّ بعيد حركة الذرّات داخل الأجسام الصلبة. من الضروري أن نتذكر أن الحركات الاهتزازية الثلاث المعروضة في الرسم فوق لا تختلف عن بعضها من حيث التردد ν (عدد الدورات في الثانية الواحدة)، فالتردد لا يعتمد إلاّ على طول الحبل وكتلة الجسم المربوط به. إنّما تختلف الحركات الاهتزازية الثلاث عن بعضها من حيث طاقتها والتي تحددها سعة الاهتزاز. في حقيقة الأمر هناك، حسب الفيزياء التقليدية، عدد لانهائي من السعات المختلفة وعليه يمكن للبندول أعلاه أن يمتلك ما لانهاية من الطاقات المختلفة.

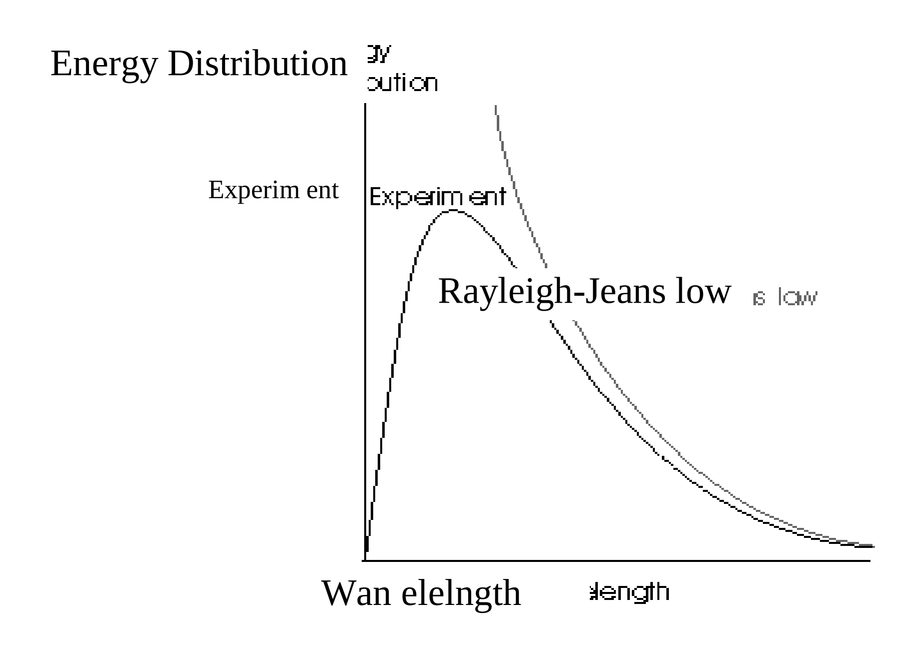
الخطوة التالية كانت تحديد عدد المهتزات التوافقية، N،الموجودة في وحدة الحجم (1 م3 مثلاً) والتي تهتز بنفس التردد •. وقد توصّل العالمان Rayleigh و Jeans إلى أنّ

$$N = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \quad \text{(1)................}$$

ولكن ما هو معدّل الطاقة التي يحملها المهتز التوافقي الواحد؟ بتطبيق مبدأ تساوي توزيع الطاقة على أنماط الحركة المختلفة (principle of equipartition) ومعاملة هذه المهتزات التوافقية كما لو كانت جزيئات غازية تنطبق عليها النظرية الحركية للغازات فإنّ معدّل الطاقة التي يحملها المهتز التوافقي الواحد ستكون (½kT لطاقة الوضع وkT ½ للطاقة الحركية). وعليه فإنّ معدّل الطاقة الذي تحمله المهتزات التوافقية، N،الموجودة في وحدة الحجم والتي تهتز بنفس التردد • هو

$$E_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} kT$$

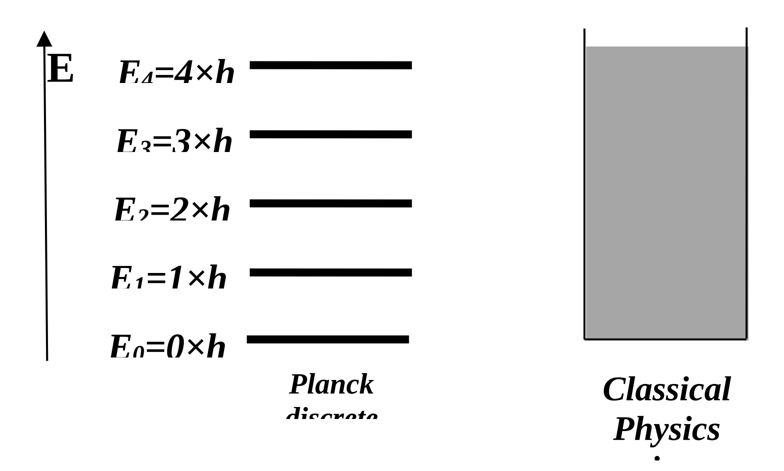
يمثّل الرسم التالي مقارنة بين النتائج التجريبية وما تتنبأ به معادلة .Rayleigh-Jeans



تتوافق معادلة Rayleigh-Jeans مع النتائج التجريبية عند الأطوال الموجية الكبيرة (الأشعة تحت الحمراء وما هو أطول منها)، لكنّها تفشل فشلاً ذريعاً عند الأمواج القصيرة، فبدلاً من أن تمر المعادلة عبر قيمة عظمى ثم ترجع متناقصةً إلى الصفر فأنّها تتصاعد متسارعةً نحو الأعلى، نحو طاقات لا نهائية. وقد عبّر العلماء عن تصاعد القدرة الإشعاعية للجسم الأسود بانخفاض الطول الموجي للأشعة المنبعثة بمصطلح الكارثة الفوق بنفسجية (UV-Catastrophe)، ذلك أنّ الجسم الأسود تنبعث منه جميع الإشعاعات بكلّ الأطوال الموجية المختلفة من 0 إلى ∞

وكلما قصرت الأطوال الموجية زادت بشدة كمية الطاقة المنبعثة التي تحملها هذه الأشعة ممّا يجعل كمية الطاقة المنبعثة من أي جسمٍ كان مهما بلغت درجة حرارته لانهائية، وهذا مخالف بوضوح لأبسط المشاهدات العملية.

بقيت الفيزياء التقليدية عاجزةً أمام مسألة الجسم الأسود. وفي العام 1900 تصدّى العالم ماكس بلانك (Max Planck) لهذه القضية واستطاع فعلاً أن يحلّها ولكن كلّفه ذلك الخروج عن بعض مسلّمات الفيزياء التقليدية. ابتدأ بلانك بتحديد عدد المهتزات التوافقية الموجودة في وحدة الحجم من الجسم الأسود وحصل على نفس التعبير الرياضي الذي استخدمه العالمان جينز وريلاي (المعادلة (1)). لكنه، وخلافاً لمسلمات لفيزياء التقليدية، افترض أنّ هذه المهتزات (البندولات) لا يمكنها أن تمتلك أيّة قيمة من قيم الطاقة، بل إنّ هناك قيماً محددة من الطاقة (وبالتالي سعات محددة) يمكن أن تهتز بها هذه المهتزات، وافترض أنّ قيم الطاقة الممكنة هذه إنّما هي من مضاعفات تردد الحركة الاهتزازية مضروباً بثابت رَمَزَ له بلانك بالحرف اللاتيني h.



لنحسب الآن العدد الكلي، Ntotal، للمهتزات التوافقية الموزعة على مستويات الطاقة المختلفة:

$$N_{total} = N_0 + N_1 + N_2 + N_3 + ... = \sum_{i=0}^{\infty} N_i$$

حيث أنّ Ni تمثل عدد المهتزات التوافقية في مستوى الطاقة i. نطبق الآن قانون توزيع بولتزمان (Boltzmann) لمعرفة العلاقة بين أعداد المهتزات في المستويات المختلفة:

$$\frac{N_i}{N_0} = \frac{e^{-E_i/kT}}{e^{-E_0/kT}} = \frac{e^{-E_i/kT}}{e^{-0/kT}} = e^{-E_i/kT}$$

$$N_i = N_0 \cdot e^{-E_i/kT}$$

ونحصل بذلك على العدد الكلي للمهتزات:

$$N_{total} = \sum_{i=0}^{\infty} N_i = N_0 \sum_{i=0}^{\infty} e^{-E_i/kT} = N_0 \sum_{i=0}^{\infty} e^{-ih\nu/kT}$$

نلاحظ أنّه تمّ تعويض $E_i = ih\nu$ في المعادلة أعلاه لأنّ طاقة كلّ مستوى هي من مضاعفات h•، كما افترض بلانك.

الخطوة التالية هي أن نقوم بتحديد الطاقة الكلية، Etotal، لجميع المهتزات الموجودة في وحدة الحجم والتي تساوي مجموع طاقة المهتزات الموجودة في كلّ مستوى:

$$E_{total} = N_0 \cdot E_0 + N_1 \cdot E_1 + N_2 \cdot E_2 + N_3 \cdot E_3 + ... = \sum_{i=0}^{\infty} N_i \cdot E_i$$

$$E_{total} = N_0 \cdot (0 \times h\nu) + N_1 \cdot (1 \times h\nu) + N_2 \cdot (2 \times h\nu) + N_3 \cdot (3 \times h\nu) + ...$$

$$E_{total} = h\nu [N_0 \times 0 + N_1 \times 1 + N_2 \times 2 + N_3 \times 3 + ...] = h\nu \sum_{i=0}^{\infty} i \cdot N_i = h\nu \sum_{i=0}^{\infty} i \cdot N_0 \cdot e^{-E_i/kT}$$

$$E_{total} = N_0 h\nu \sum_{i=0}^{\infty} i \cdot e^{-ih\nu/kT}$$

ممّا تقدّم يمكننا حساب معدّل (متوسّط) طاقة المهتز الواحد وذلك بتقسيم طاقة المهتزات الكلية على عدد هذه المهتزات:

$$\overline{E}_\nu = \frac{N_0 h\nu \sum_{i=0}^{\infty} i \cdot e^{-ih\nu/kT}}{N_0 \sum_{i=0}^{\infty} e^{-ih\nu/kT}} = \frac{h\nu \sum_{i=0}^{\infty} i \cdot e^{-ih\nu/kT}}{\sum_{i=0}^{\infty} e^{-ih\nu/kT}}$$

وبتقييم المتسلسلات في البسط والمقام نحصل على:

$$\overline{E}_\nu = h\nu \frac{e^{-x} \big/ \left(1-e^{-x}\right)^2}{1 \big/ \left(1-e^{-x}\right)} = h\nu \frac{e^{-x}}{1-e^{-x}} = h\nu \frac{1}{e^{x}-1} = h\nu \frac{1}{e^{h\nu/kT}-1}$$

حيث أنّ: $x = \frac{h\nu}{kT}$.

ونستطيع حساب معدّل الطاقة المنبعثة من المهتزات التوافقية الموجودة في وحدة الحجم والتي تهتز بنفس التردد ، وذلك بضرب عددها ، بمعدّل طاقة المهتز الواحد $\bar{E}\nu$:

$$E_\nu = N \times \overline{E}_\nu = \frac{8\pi \nu^2}{c^3} \cdot \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT}-1}$$

المعادلة الأخيرة معروفة بتوزيع بلانك وتتطابق مع التوزيع المشاهد تجريبياً.

تدريب 1: اشتق من توزيع بلانك قانون شتيفان!

القدرة الإشعاعية الكلية لوحدة الحجم من الجسم الأسود هي المساحة المحصورة بين المنحنى ومحور السينات. بلغة الرياضيات هي تكامل اقتران التوزيع:

$$E_{total} = \int_0^\infty \frac{8\pi \nu^2}{c^3} \cdot \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} d\nu$$

$$substitute \qquad x = \frac{h\nu}{kT} \qquad \Rightarrow \qquad \nu = \frac{kT}{h} \cdot x$$

$$d\nu = \frac{kT}{h} \cdot dx$$

$$E_{total} = \int_0^\infty \frac{8\pi (kT)^4}{c^3 h^3} \cdot \frac{x^3}{e^x - 1} dx = \frac{8\pi k^4 T^4}{h^3 c^3} \int_0^\infty \frac{x^3}{e^x - 1} dx = \frac{8\pi k^4 T^4}{h^3 c^3} \cdot \frac{\pi^4}{15} = \frac{8\pi^5 k^4}{15 h^3 c^3} \cdot T^4$$

توزيع بلانك يُختزل عند الأطوال الموجية الكبيرة إلى معادلة Rayleigh-Jeans:

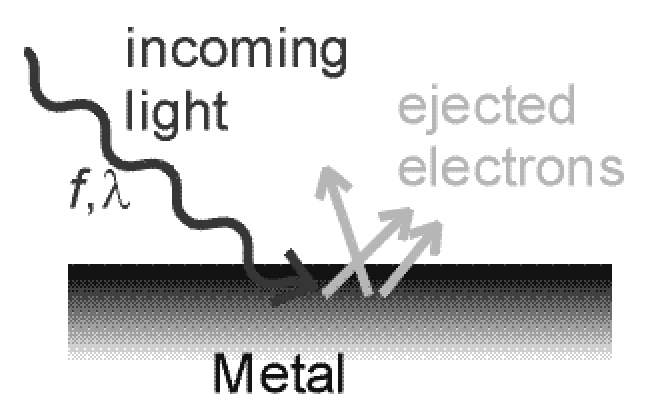
عندما يكون الطول الموجي كبيراً فإنّ التردد يكون صغيراً:•/c = •، وعليه فإنّ $h\nu/kT$ تكون أيضاً صغيرة. نفرض أنّ $x = h\nu/kT$. نعرف من الرياضيات أنّه عندما تكون x صغيرة فإنّ $e^x - 1 \approx x$.

$$\overline{E}_\nu = \frac{8\pi \nu^2}{c^3} \cdot \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} \approx \frac{8\pi \nu^2}{c^3} \cdot \frac{h\nu}{h\nu/kT} = \frac{8\pi \nu^2}{c^3} \cdot kT$$

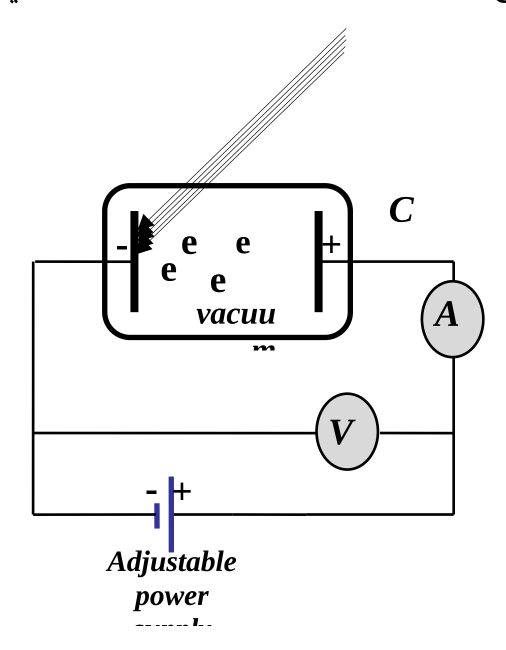
تدريب 3: اشتق من توزيع بلانك قانون ڤين!

التأثير الكهروضوئي:

عند تسليط أشعّة كهرومغناطيسية على سطح فلز، فإنّه قد تنطلق الكترونات منبعثةً من هذا الفلز تاركةً إياه. تسمّى هذه الالكترونات المنبعثة بالالكترونات الضوئية (photoelectrons) وتسمّى هذه الظاهرة بالتأثير الكهروضوئي (photoelectric effect).



يمكن تجميع الالكترونات المنبعثة وتحويلها إلى تيار كهربائي على النحو التالي:

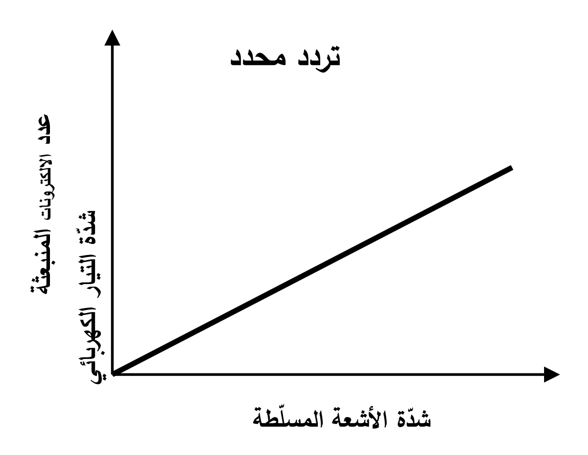


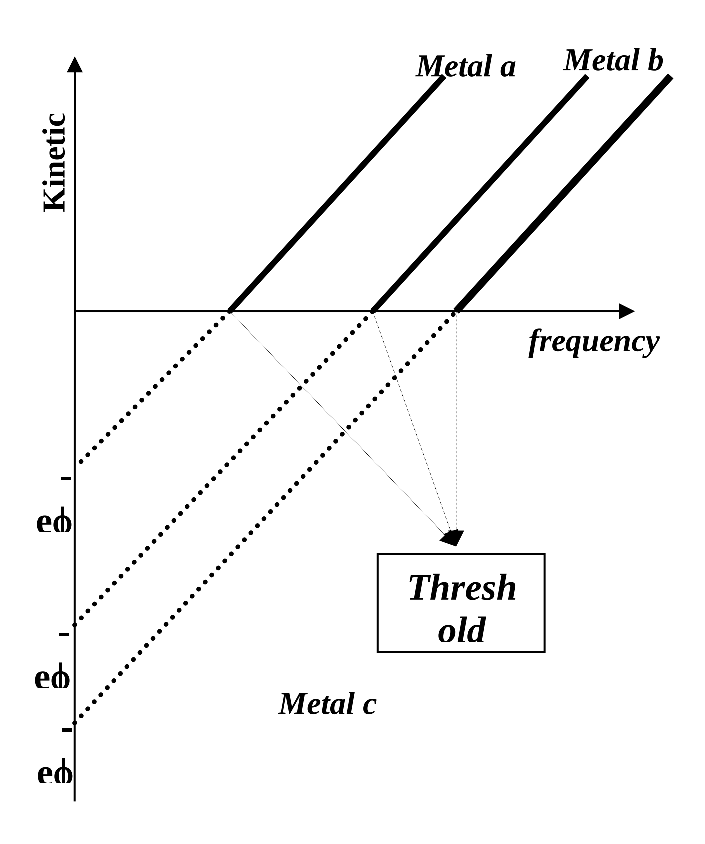
يُجعل لوحُ الفلز أحدَ أقطاب مكثّف كهربائي مثبّتٍ داخل أنبوب مفرّغ من الهواء، ويكون الفلز متصلاً بالقطب السالب لمصدر جهد كهربائي ثابت قابل للتغيير. عند تسليط أشعة ذات طاقة كافية على لوح الفلز فإنّه تنبعث الكترونات من الفلز وتتجه متسارعةً نحو المُجَمِّع (Collector, C) ويسري تيار كهربائي في الدائرة الكهربائية، ويمكن قراءة شدة التيار هذا بواسطة الأموميترA وقراءة فرق الجهد بين الفلز والمجمّع بواسطة الفولتميترV.

ويمكن استخدام الدائرة الكهربائية أعلاه بغرض تحديد الطاقة الحركية للإلكترونات عند انبعاثها من سطح الفلز وذلك بتغيير قيمة فرق الجهد الذي يزوّد المصدرُ به الدائرةَ الكهربائية: يتمّ تخفيض فرق جهد المصدر تدريجياً وبذلك ينخفض تأثير المصدر على حركة الالكترونات داخل الأنبوب، وعندما يصبح فرق جهد المصدر صفراً ينعدم هذا التأثير وتتحرك الالكترونات حرةً داخل الأنبوب وتكون طاقتها هي نفس الطاقة الحركية التي تركت بها الفلز. يستمرّ تخفيض فرق جهد المصدر تحت الصفر ليصبح سالباً ممّا يعني أنّه قد تمّ قلب إشارة قطبي المصدر ليصبح المُجمّع سالباً و لوح الفلز موجباً. عندها تبدأ الالكترونات الموجودة في الأنبوب بالتباطؤ نتيجة تنافرها مع المجمع السالب فتصل إليه بسرعات أقلّ من قبل. وإذا استمرّ تخفيض فرق الجهد تدريجياً فإنّنا نصل عند نقطة محدّدة تكون فيه طاقة الالكترونات الحركية مساوية لطاقة التنافر مع المجمع فلا تستطيع الالكترونات عندها الوصول إلى المجمع وينعدم سريان التيار الكهربائي في الدائرة، ويسمّى هذا الجهد اللازم لمنع الالكترونات من الوصول إلى المجمع بجهد المنع (stopping potential).

ويمكن تلخيص نتائج تجارب التأثير الضوئي بالنقاط التالية:

عند تسليط أشعة ذات طول موجي محدد (monochromatic) على سطح الفلز فإنّ الالكترونات المنبعثة تكون لها طاقة حركية معينة لا تعتمد إلاّ على تردّد الموجة المستخدمة، ولا تسبب زيادة شدة الأشعة المستخدمة (أي عدد الموجات المسلطة على الفلز) أي تغيير في قيمة الطاقة الحركية للالكترونات المنبعثة وإنّما تسبب زيادة شدّة الأشعة المسلطة زيادةً في عدد الالكترونات المنبعثة وبالتالي شدة التيار الكهربائي الذي يتم قياسه بواسطة الأموميتر.



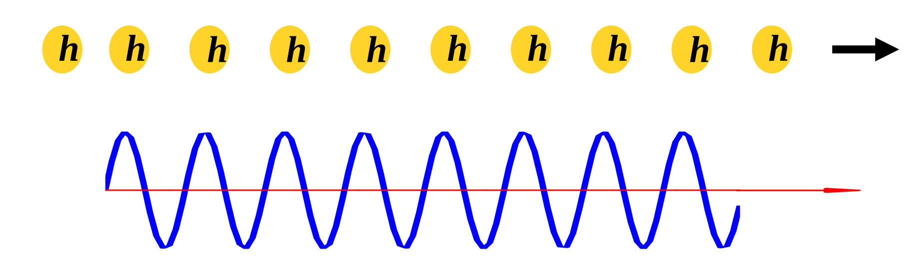


من أجل أن تنبعث الالكترونات من الفلز يجب أن يكون تردّد الأشعة المستخدمة أكبر من أو، على الأقل، مساوياً لقيمة تردد محددة تسمّى تردد العتبة (threshold frequency)، وكلّما زاد تردد الموجة المستخدمة في تشعيع الفلز عن تردّد العتبة زادت خطّياً الطاقة الحركية للالكترونات المنبعثة. نلاحظ في الرسم التالي أنّ قيمة تردّد العتبة تختلف من فلز لآخر.

بالرغم من بساطة تجارب التأثير الضوئي إلاّ أنّ الفيزياء التقليدية وقفت عاجزةً أمام تفسير نتائجها، فالأشعة الضوئية المسلطة على الفلز إنّما هي، حسب الفيزياء التقليدية، موجات كهرومغناطيسية وهي على هذا سيل "متصل" من الطاقة، فإذا وقعت هذه الأشعة على الفلز ساهمت في رفع طاقة مكوناته وتظلّ طاقة هذه المكونات تزداد شيئاً فشيئاً مع استمرار تسليط الأشعة حتى تمتلك الالكترونات داخل الفلز الطاقة الكافية التي تمكنها من مفارقته والانبعاث بعيداً عنه. إذاً، حتى لو كان تردد الأشعة المسلطة ضئيلاً جدّاً فإنّ الالكترونات ستنبعث –بناءَ على مبادئ الفيزياء التقليدية- لا محالة بإحدى طريقتين: إمّا زيادة مدةّ تسليط الأشعة حتى يتراكم ما يكفي من الطاقة أو زيادة شدّة الأشعة المستخدمة ممّا يزيد من كمية الطاقة الواقعة على الفلز في وحدة الزمن. إنّ تصوّرات الفيزياء التقليدية هذه مخالفة لما هو مشاهد ممّا يجعل الفيزيائيين في شكٍّ من تصوراتهم التقليدية.

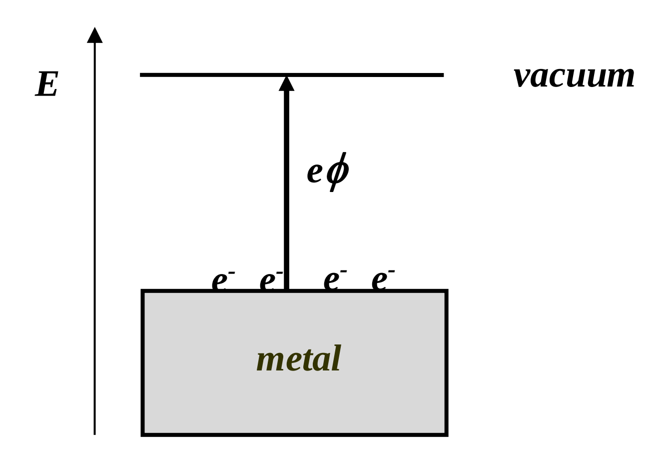
استطاع أينشتاين أن يقدّم في العام 1905 تفسيراً مقبولاً لنتائج تجارب التأثير الضوئي، مستفيداً من أفكار بلانك التي كان طرحها في اشتقاقه لمنحنى توزيع إشعاعات الجسم الأسود والتي تقضي بأنّ الأشعة المنبعثة من الجسم الأسود إنّما هي من مضاعفات الكمّ h•. اقترح اينشتاين أنّ الأشعة بشكل عام

إنّما هي سيل من "كمّات" الطاقة، أو قل سيل من "باكيتات" طاقة صغيرة تتوالى الواحد تلو الآخر، كلّ "باكيت" من هذه "الباكيتات" يحمل كمّاً من الطاقة مقداره h•. وقد سميت "باكيتات" الطاقة هذه بالفوتونات وعليه فإنّ طاقة الفوتون الواحد هي E=h•.وبناءَ على هذا التصور الذي وضعه اينشتاين للأشعة فإنّ شدّة الضوء تكون عدد الفوتونات المنبعثة من المصدر في الثانية الواحدة والتي تمرّ خلال سم2.



بعد ذلك طرح اينشتاين آلية لانبعاث الإلكترون من الفلز: لا بد من إعطاء الإلكترون الطاقة الكافية للتحرر من كلّ قوى الجذب الداخلي التي تمنعه من الانفلات، تماماً كما نفعل حين نريد إطلاق صاروخ إلى الفضاء حيث يجب أن يزوّد الصاروخ المنطلق بطاقة حركية تمكنّه من التغلب على قوى الجاذبية الأرضية ليتحرّر من تأثيرها. أمّا إذا زُوّد الصاروخ بطاقة أقل من اللازم فإنّه يندفع إلى الأعلى متباطئاً ويظلّ يفقد سرعته حتى يتوقّف

ثمّ يسقط عائداً تحت تأثير الجاذبية. يسمّى مستوى الطاقة الذي يجب أن يصل إليه الإلكترون حتى يعتبر متحرّراً من تأثير الفلز بمستوى الفراغ وتسمّى الطاقة اللازمة لنقل الإلكترون من الفلز إلى مستوى الفراغ بدالة الشغل (work function). يرمز لدالة الشغل بالرمز • وتكون وحدتها بالفولت أو بالجول حيث أنّ العلاقة بين الطاقة ودالة الشغل هيE=e•.



في تفسير ظاهرة التأثير الضوئي يجب أن نتذكّر دائماً أنّ فوتوناً واحداً فقط هو المسئول عن انطلاق الإلكترون الواحد من الفلز، فإذا كانت طاقة الفوتون الساقط أقل من دالة الشغل فإنّ الإلكترون لن يستطيع الانفلات، وعليه فإنّ طاقة الفوتون اللازم لانفلات الإلكترون يجب أن تكون على الأقل مساوية لدالة الشغل:

$$h\nu_{th} = e\phi$$

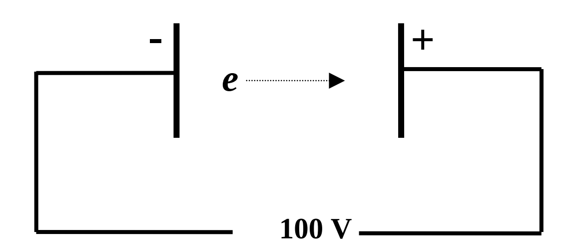
أمّا إذا كانت طاقة الفوتون الساقط أعلى من دالة الشغل فإنّ الالكترون سوف يمتص طاقة الفوتون مستخدماً جزءَ منها في الانفلات ومستفيداً ممّاً تبقى على شكل طاقة حركة:

$$h\nu = e\phi + E_{kinetic}$$
$$E_{kinetic} = -e\phi + h\nu$$

إنّ المعادلة الأخيرة هي معادلة الخط المستقيم الذي حصلنا عليه تجريبياً (الرسم في الصفحة 13) والذي يمكّننا من تحديد قيمة الثابت h بدقة والذي يمثّله ميل الخط المستقيم. من الواضح أيضاً ممّا تقدّم أنّ زيادة شدة الضوء المسلط على الفلز إنّما تعني زيادةً في عدد الفوتونات وهذا لا يؤثّر على الطاقة الحركية للالكترونات المنبعثة وإنّما فقط على عددها.

بهذا استطاع اينشتاين أن يفسر نتائج تجارب التأثير الضوئي مؤصّلاً لمبدأ تكمية الطاقة كمفهوم أساسي في الفيزياء، وقد نال على ذلك جائزة نوبل في الفيزياء. ومن الجدير بالذكر أنّه في نفس العام الذي نشر اينشتاين تفسيره للتأثير الكهروضوئي كان قد نشر أيضاً نظريته النسبية الخاصة وكذلك تفسيره للحركة البراونية العشوائية في السوائل.

تدريب 4: يقع الكترون تحت تأثير فرق جهد مقداره 100 فولت. احسب الطاقة الحركية للالكترون عند اصطدامه بالآنود. احسب سرعة الالكترون عند اصطدامه بالآنود.



طاقة الإلكترون الوضعية نتيجة وجوده في الحقل الكهربائي: $E_{e-}=e\times V$

حيث أنّ e هي الشحنة الأولية ومقدارها 1.6×10^{-19} As و V هي فرق الجهد المؤثر على الإلكترون، وتبلغ قيمتها: $E=1.6\times10^{-17}$ J =100 eV. تتحول هذه الطاقة الوضعية كليّةً إلى طاقة حركة عند الاصطدام، وعليه $E_{kinetic}=½mv^2$

$E_{kinetic}=1.6\times10^{-17}$ J. أتمم حساب سرعة الإلكترون عند اصطدامه!

تدريب 5: يوضّح الجدول المرفق قيم دالات الشغل لبعض الفلزات:

TABLE 28.1

Work Functions of Selected Metals

Metal	ϕ (eV)
Na	2.28
Al	4.08
Cu	4.70
Zn	4.31
Ag	4.73
Pt	6.35
Pb	4.14
Fe	4.50

احسب لكل عنصر قيمة دالة الشغل بوحدة الجول ثمّ احسب لكل عنصر تردّد العتبة.

أيّ العناصر أعلاه تنفلت منه الالكترونات بتسليط أشعة مرئية عليه؟

احسب الطاقة الحركية (ومنها السرعة) التي ينفلت بها الالكترون من سطح الألمنيوم عند تعريضه لأشعة فوق بنفسجية طولها 200 nm.

تدريب 6: احسب عدد الفوتونات المنبعثة من لمبة صفراء (100 W) في الثانية الواحدة على فرض أنّ الضوء المنبعث هو أحادي الموجة (monochromatic) بطول560 nm.

الطاقة الكلية المنبعثة من اللمبة في الثانية الواحدة هي 100 W=100 J/s.

طاقة الفوتون الواحد:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6.6\times10^{-34}\times3.0\times10^{8}}{560}\cdot\frac{Js\,ms^{-1}}{nm} = \frac{6.6\times10^{-34}\times3.0\times10^{8}}{560\times10^{-9}}J = 3.7\times10^{-19}J$$

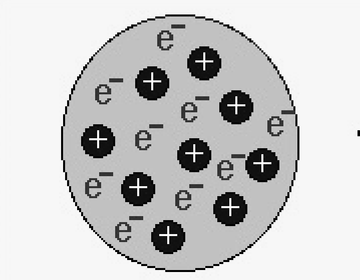
عدد الفوتونات المنبعثة في الثانية الواحدة=

الطاقة الكلية المنبعثة في الثانية الواحدة ÷ طاقة الفوتون الواحد

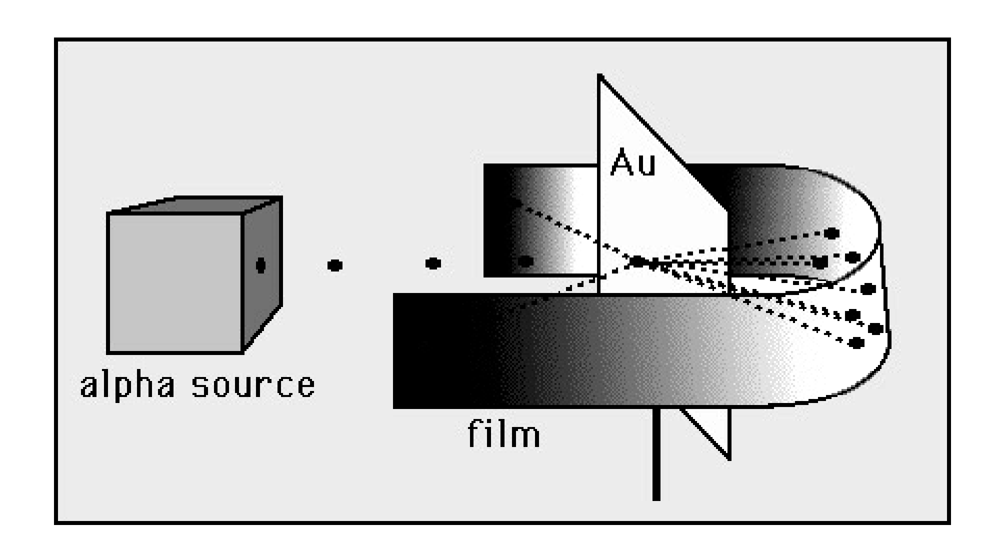
$$= \frac{100}{3.7\times10^{-19}}\cdot\frac{J\,s^{-1}}{J\,/\,photon} = 2.7\times10^{20}\quad photon\,/\,s$$

نموذج رذرفورد (Rutherford)

بحلول العام 1911 كانت مكوّنات الذرات من بروتونات والكترونات قد أصبحت معروفة إلاّ أنّ تركيب الذرة كان لا زال مجهولاً. وقد اقترح تومسون (Thomson) النموذج التالي لتوزيع البروتونات والالكترونات في الذرة:

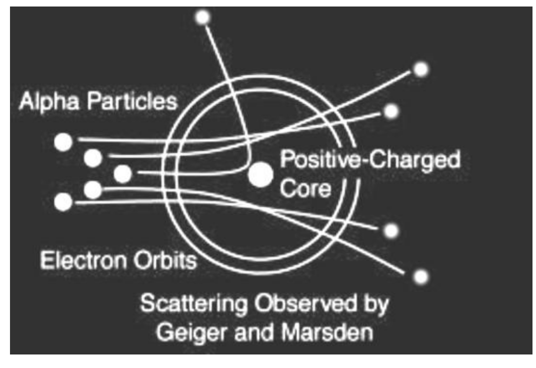


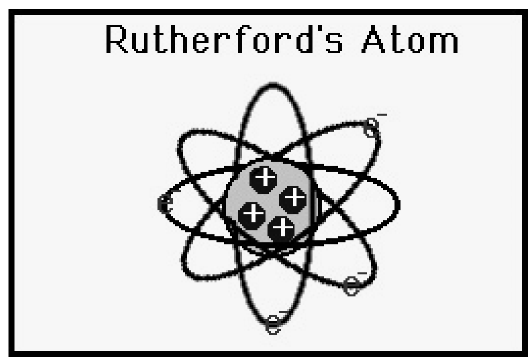
في محاولة منه للتأكد من صحة نموذج تومسون قام العالم رذرفورد بإجراء تجربة تتضمّن قذف صفيحة رقيقة من الذهب بجسيمات ألفا •-particles(وهي جسيمات ثقيلة تعادل أنوية ذرات الهيليوم). لاحظ رذرفورد أن معظم جزيئات ألفا الموجهة إلى صفيحة الذهب تخترقها دون أن يحدث لها أي تغيير في اتّجاهها باستثناء جزء بسيط من جسيمات ألفا يرتدّ إلى الخلف وبزوايا كبيرة نسبياً.



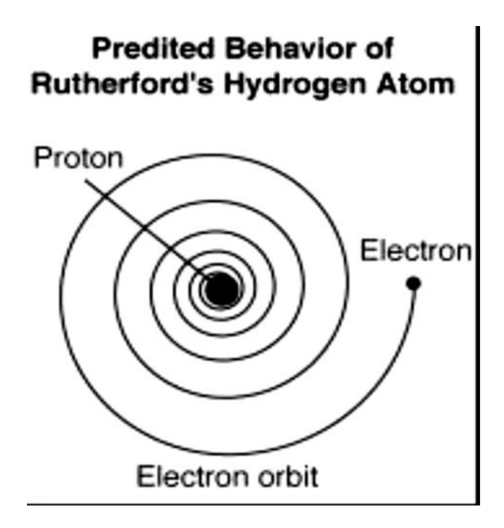
لم تكن هذه النتائج متفقةً مع نموذج تومسون والذي يقتضي توزيعاً متساوياً للكتلة في داخل الذرة. فجسيمات ألفا التي اخترقت الصفيحة لا شكّ بأنها اصطدمت بأجسام خفيفة جدّاً لم تؤثّر على مسارها (كأن تصطدم سيارة مسرعة بزجاجة ماء مثلاً)،

أمّا العدد البسيط من الجسيمات والذي ارتد إلى الخلف فلا شكّ أنّه اصطدم بجسيمات ثقيلة كما أنّ زوايا الارتداد تشير إلى أنّها مشحونة شحنةً موجبة تشبه شحنة جسيمات ألفا. استنبط رذرفورد أنّ الجسيمات السالبة الخفيفة (الالكترونات) تشغل معظم حيّز الذرات وأنّ الجسيمات الموجبة الثقيلة (البروتونات) لا تشكّل إلاّ جزءاً يسيراً من هذا الحيز. يعرف هذا النموذج أيضاً بالنموذج الكوكبي (planetary model) حيث أنّ حركة الالكترونات حول البروتونات (النواة) تشبه حركة الكوكب حول الشمس.





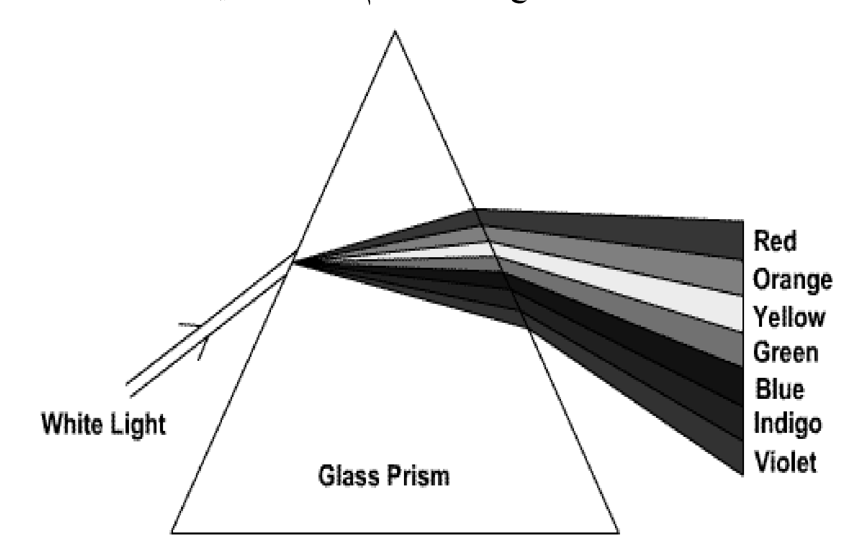
المشكلة في نموذج رذرفورد من وجهة نظر الفيزياء التقليدية هي أنّ الالكترونات عندما تقوم بحركة دائرية فإنه يفترض فيها أن تصدر أشعة كهرومغناطيسية، ذلك أنّ الحركة الدائرية هي حركة اهتزازية مُعجّلة أو متسارعة (accelerated motion) ومن المعروف عملياً أنّه عندما تقوم الشحنات بحركة معجلة فإنّها تبعث أشعة (هذا هو مبدأ عمل المرسل في جهاز الراديو والذي يقوم بإرسال أشعة راديو إلى الجو، وهذه الظاهرة هي التي استخدمها هرتس Hertz في تكوين موجات كهرومغناطيسية ومن ثمّ رصدها). ولكن إذا كانت الالكترونات تبعث أشعّة كهرومغناطيسية -وهي شكل من أشكال الطاقة- فإنّ قانون حفظ الطاقة يحتّم أن تنخفض طاقة الإلكترون تدريجياً فيقترب بذلك أكثر فأكثر من البروتونات حتى يلتحم معها وتنهار بذلك الذرات وتختفي.



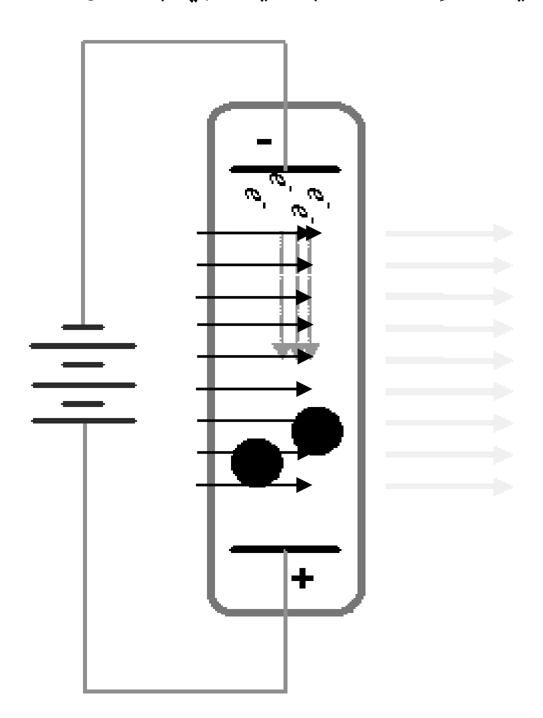
وقعت الفيزياء التقليدية مرّةً أخرى في مأزق حرج، فقوانينها تدلّ على عدم استقرار ذرة رذرفورد وبالتالي عدم إمكانية وجودها، في حين أنّ التجربة تؤكّد صحة النموذج. ما العمل؟ قدّم العالم بور (Bohr) نظرية تفسّر استقرار ذرة رذرفورد، ولكن مرّة أخرى، كانت نظريته خارج أطر الفيزياء التقليدية.

الطيف الخطّي (Line Spectrum)

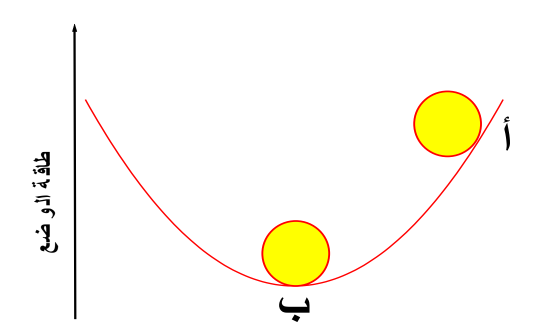
قبل الانتقال إلى نظرية بور لا بدّ لنا من التعريج على ظاهرة الطيف الخطّي الذي كان معروفاً منذ نهاية القرن التاسع عشر ولكن لم يكن له تفسير مقبول.



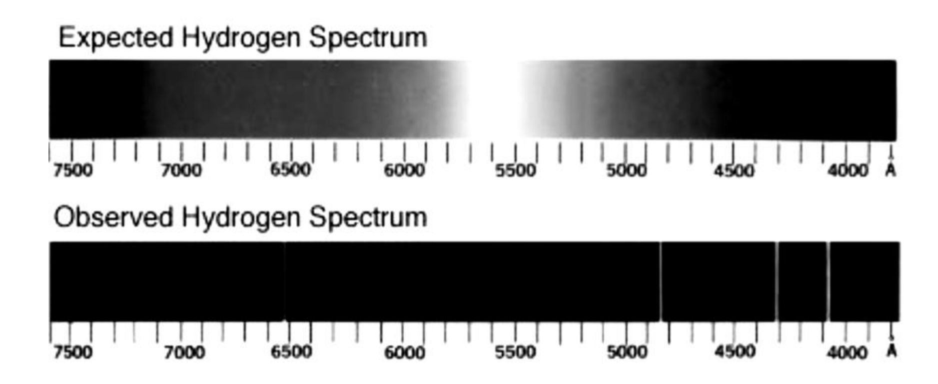
عند تسليط ضوء أبيض على محلّل (منشور زجاجي مثلاً) فإنّ الأمواج الضوئية المختلفة المكونة للضوء الأبيض سوف تنكسر بزوايا مختلفة بناءَ على طولها الموجي ممّا يجعلها تبتعد عن بعضها فتظهر ألوانها للعين (ظاهرة قوس قزح). يسمّى الطيف الناتج بـ "الطيف المتّصل" وذلك لاحتوائه على جميع الأطوال الموجية الممكنة، فمصدر الضوء الأبيض (الشمس مثلاً) ما هو إلاّ جسم أسود يبعث أشعة بشتّى الأطوال. لكن ماذا يحدث إذا وضعنا لمبة هيدروجين بدلاً من مصدر الضوء الأبيض؟



لمبة الهيدروجين هي في حقيقة الأمر مجرّد أنبوب تفريغ مليء بغاز الهيدروجين، وعند وضع فرق جهد عالٍ (3-10 kV) بين القطبين فإن الإلكترونات تنفلت من القطب السالب (cathode) وتتجه متسارعة نحو القطب الموجب (anode) حيث تصطدم في طريقها بجزيئات الهيدروجين فتحوّلها إلى ذرات مثارة (excited)، أي ذرات بطاقات عالية أعلى من حالة الاستقرار(حين يكون الإلكترون في فلك 1s). لا تلبث ذرّات الهيدروجين المثارة أن تفقد الطاقة التي اكتسبتها عند اصطدامها بالإلكترونات وترجع إلى حالة الاستقرار حيث تكون طاقتها أقل ما يمكن، تماماً كما تفعل الكرة "المثارة" في الموقع أ ب انتقاها إلى حالة الاستقرار في الموقع ب.



برجوع ذرات الهيدروجين المثارة إلى حالة الاستقرار ينبعث فرق الطاقة بين الحالة المثارة وحالة الاستقرار على شكل أشعّة. يمكننا الآن تحليل هذه الأشعة بواسطة تمريرها خلال المنشور الزجاجي أعلاه ورصد الطيف الناتج على شاشة أو فيلم مثلاً.



ما نتوقّع أن نراه هو طيف متّصل، فحسب الفيزياء التقليدية، تستطيع ذرّة الهيدروجين أن تمتلك في حالة الإثارة أيّة قيمة من قيم الطاقة (انظر الرسم في الصفحة الثامنة، يمين)، وعليه فإنّه يفترض حال رجوعها إلى حالة الاستقرار أن تبعث كلّ الأطوال الموجية الممكنة. إلاّ أنّ المشاهَد هو طيف خطّي، بمعنى أنّ ما نحصل عليه هو عدد يسير جدّاً من الموجات بأطوال موجية محدّدة (أربعة أمواج فقط ضمن الأشعة المرئية)، ممّا يشير إلى أنّ هذه الذرّات المثارة لا يسمح لها أن تمتلك أيّة قيمة شاءت من الطاقة!

وجد العلماء أنّ الطيف الخطي لا يقتصر فقط على الأشعة المنبعثة من لمبة الهيدروجين بل يمكن الحصول عليه باستخدام العناصر الأخرى المختلفة، فأية ذرّة مثارة تبعث أمواجاً بأطوال محدّدة فقط عند رجوعها إلى حالة الاستقرار (الطيف الذرّيّ يشكلٍ عامّ خطيّ وليس متّصلاً).

إلاّ أنّ طيف الهيدروجين نال اهتماماً خاصّاً من العلماء في نهاية القرن التاسع عشر الذين عكفوا على محاولة استنباط علاقة بين الأطوال الموجية في طيف الهيدروجين، نذكر منهم ليمان (Lyman) وبالمر (Balmer) وباشن (Paschen). وقد استطاع العالم ريدبرج (Rydberg) أن يلخّص جهود من سبقه من العلماء على شكل معادلة تجريبية empirical equation (معنى ذلك أنّ هذه المعادلة لم يتم اشتقاقها من أسس نظرية وإنّما وجد بالتجريب أنّها مناسبة لوصف نتائج التجارب):

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right)$$

حيث أنّ R هو ثابت ريدبرج وقيمته 1.09678×107m-1، n1 و n2 هي أعداد صحيحة موجبة.

بالرغم من أنّ معادلة ريدبيرج تصف النتائج التجريبية بدقّة إلاّ أنّه لم يكن مفهوماً من أين جاء هذا الثابت وما معناه كما أنّه لم يكن مفهوماً ما هي هذه الأعداد الصحيحة.

نموذج بور (Bohr’s model) للذرة:

وضع بور نموذجاً للذرة يتوافق مع نتائج تجارب رذرفورد وتجارب الطيف الذري واعتمد في هذا النموذج على المسلّمات التالية (المسلّمات هي عبارات لا برهان على صحّتها ولكنّنا "نسلّم" بصحّتها طالما لم يثبت خلافها):

يدور الإلكترون حول النواة بمدارات دائريّة، منجذباً نحو النواة بواسطة قوى التجاذب الكولوميّة التقليدية(قوى التجاذب الإلكتروستاتيكي Coulombicforces).

هناك عدد محدّد من المدارات يسمح للالكترون بالتواجد فيها، وعلى ذلك فهناك قيم محدّدة من الطاقة يسمح للإلكترون بامتلاكها حيث أنّ كلّ مدار له طاقة محدّدة.

عند انتقال الإلكترون من مدار إلى آخر فإنّ فرق الطاقة بين المدارين يتمّ امتصاصه أو انبعاثه على شكل موجات كهرومغناطيسية تردّدها هو مقدار فرق الطاقة بين المدارين مقسوماً على ثابت بلانكh.

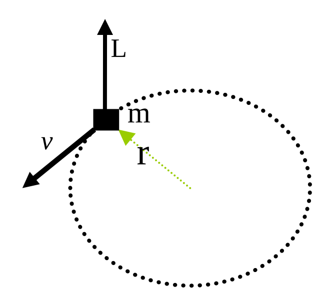
$$\nu = \frac{\Delta E}{h} = \frac{\left|E_f - E_i\right|}{h}$$

Ei هي طاقة المدار الابتدائي الذي كان فيه الإلكترون قبل الانتقال و Ef هي طاقة المدار النهائي الذي انتقل إليه الإلكترون.

عزم دوران الإلكترون حول النواة (العزم الزاويّ) هو من مضاعفات h/2•.

$$L = n \cdot \frac{h}{2\pi}$$
$$n = 1, 2, 3, \ldots$$

لتوضيح مفهوم العزم الزاويّ، انظر الرسم التالي حيث تدور الكتلة m في مدار دائري نصف قطره r وبسرعة ثابتة مقدارها v:



العزم الزاويّ L يساوي $\vec{L}=\vec{r}\times(m\vec{v})=\vec{r}\times\vec{p}$. وهو قيمة متّجهة متعامدة على متّجهي السرعة ونصف القطر وتنطبق عليها قاعدة اليد اليمنى.

شرع بور ببناء نموذجه منطلقاً من حقيقة أنّ الإلكترون الدائر حول النواة يجب أن يكون- من حيث بعده عن النواة- في حالة اتّزان ميكانيكي، إذ إنّه يظلّ في مداره فلا يقترب ولا يبتعد عن النواة، وهذا يعني أنّ القوة التي تجذبه إلى النواة يجب أن تكون مساويةً للقوّة التي تطرده بعيداً عنها:

قوّة الجذب الكولوميّة = القوّة الطاردة المركزيّة

قوّة الجذب الكولوميّة:

$$F_{el}=\frac{1}{4\pi\,\varepsilon_0\varepsilon_r}\cdot\frac{q_1\cdot q_2}{r^2}=\frac{1}{4\pi\,\varepsilon_0}\cdot\frac{Ze^2}{r^2}$$

Ze = شحنة النواة.

e = الشحنة الأوليّة ومقدارها 1.6×10-19As.

Z = العدد الذري (عدد البروتونات).

r = بعد الإلكترون عن النواة.

•r = 1 للفراغ.

القوّة الطاردة المركزيّة: $F = m \cdot a = m \cdot \frac{v^2}{r}$

v = سرعة الإلكترون

m = كتلة الإلكترون

إذاً: $$m \cdot \frac{v^2}{r} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Ze^2}{r^2}$$

.............................(2)

ومنها: $r = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Ze^2}{mv^2}$ ......(3) و $v^2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Ze^2}{mr}$

.............................(4)

من المعادلة (2) وبتطبيق المسلمة الأخيرة (ث):

$$m \cdot v^2 \cdot r = \frac{Ze^2}{4\pi\,\varepsilon_0}$$

$$(m\,v\,r) \cdot v = \frac{Ze^2}{4\pi\,\varepsilon_0}$$

$$L \cdot v = \frac{Ze^2}{4\pi\,\varepsilon_0}$$

$$v = \frac{Ze^2}{4\pi\,\varepsilon_0\,L} = \frac{Ze^2}{4\pi\,\varepsilon_0} \cdot \frac{2\pi}{n\,h} = \frac{Ze^2}{2\,\varepsilon_0\,n\,h}$$

$$v^2 = \frac{Z^2 e^4}{4\varepsilon_0^2\,n^2 h^2}$$

تعوّض المعادلة الأخيرة في المعادلة رقم (3):

$$r = \frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 m} \cdot \frac{1}{v^2} = \frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 m} \cdot \frac{4\varepsilon_0^2\,n^2 h^2}{Z^2 e^4} = \frac{\varepsilon_0\,n^2\,h^2}{\pi\,m\,Z\,e^2} = a_0\,\frac{n^2}{Z}$$

$$a_0 = \frac{\varepsilon_0\;h^2}{\pi\,m_e\,e^2} \qquad \textit{Bohr radius}$$

(5)..............................

نحسب الآن بالطريقة التقليديّة الطاقة الكلية للإلكترون والتي هي مجموع طاقته الحركية (K) وطاقته الوضعية (V):

الأولى ناتجة عن حركة الإلكترون والثانية نتيجة وجوده في حقل قوّة (أي وقوعه تحت تأثير قوّة ما، وهي قوة التجاذب الكولومية في حال الإلكترون أعلاه).

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m \cdot \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Ze^2}{mr} = \frac{1}{8\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Ze^2}{r}$$

$$V = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Ze^2}{r}$$

$$E_{total} = K + V = -\frac{1}{8\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Ze^2}{r} = -\frac{Ze^2}{8\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{\pi m Ze^2}{\varepsilon_0 n^2 h^2} = -\frac{Z^2 e^4 m}{8\varepsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2} = -A\frac{Z^2}{n^2} \qquad ...(6)$$

$$A = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2}$$

تدريب (7): احسب قيمة الثابت A حسب المعادلة الأخيرة بوحدة الجول (J) وكذلك بوحدة eV. واحسب حسب المعادلة (5) نصف قطر بور (a0) وتأكّد من صحّة الوحدة.

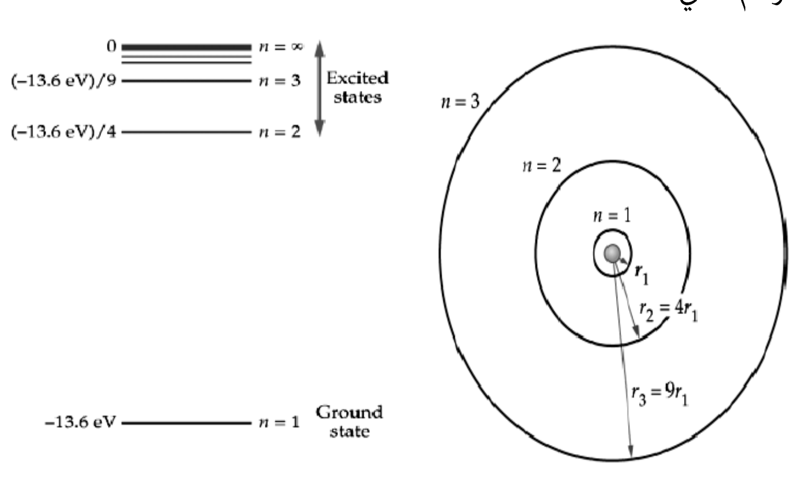
نستخلص من المعادلة (6) العديد من الأمور المهمّة:

كون طاقة الإلكترون سالبةً تعني أنّ الإلكترون واقع تحت تأثير النواة منجذب إليها، ويتحرّر الإلكترون من تأثير النواة بانتقاله إلى المستوى n=∞ حيث تصبح طاقته حسب المعادلة (6) صفراً.

كلّما ازدادت شحنة النواة (أي ازداد عدد البروتونات Z) كانت الطاقة سالبةً أكثر ممّا يعني زيادة تأثير النواة على الإلكترون وزيادة جذبها له. قارن بين طاقة إلكترون موجود في المستوى الأول (n=1) في ذرّة الهيدروجين وآخر كذلك في المستوى الأول ولكن في ذرّة الهيليوم. طاقة الإلكترون الأوّل هي(A-) في حين أنّها في الحالة الثانية (4A-).

بزيادة n يزداد بعد الإلكترون عن النواة (المعادلة 5) كما تزداد طاقته (المعادلة 6). تذكّر أنّ -2 أكبر من -4، وعليه فانخفاض القيمة العددية للطاقة بزيادة n الموجودة في المقام في المعادلة (6) يعني زيادة في الطاقة. هذه الزيادة في الطاقة هي التي تمكّن الإلكترون من الابتعاد أكثر عن النواة (جرّب أن ترمي جسماً إلى الأعلى؛ كلّما دفعته بقوّة أكبر، وكانت بذلك الطاقة الحركية المعطاة له أكبر، كلّما ابتعد أكثر نحو الأعلى).

كلّما ازدادت n زادت مستويات الطاقة قرباً من بعضها البعض، كما هو ملاحظ في الرسم التالي.



كيف يفسّر الآن نموذج بور استقرار ذرّة رذرفورد؟ حيث أنّ الإلكترون لا يستطيع أن يمتلك أيّة قيمة شاء من قيم الطاقة فإنّه في دورانه حول النواة في أحد المدارات المسموح بها لا يبعث أشعة كهرومغناطيسية بالرغم من كون حركته معجّلة (متسارعة)، ذلك أنّ الإلكترون بفرض انبعاث أشعّة كهرومغناطيسية منه سيفقد شيئاً فشيئاً جزءاً يسيراً من طاقته ممّا يضع الإلكترون في مستويات طاقة غير مسموح بها.

e

allowed

Not allowed

allowed

كيف يفسّر نموذج بور كون الطيف الذرّيّ طيفاً خطّياً؟ لنفرض أنّ الإلكترون انتقل من مستوى طاقة عالٍ (n2=nhigh) إلى مستوى طاقة أخفض (n1=nlow). إنّ فرق الطاقة ، وحسب المسلمة الثالثة (ت) من مسلّمات بور، سينبعث على شكل موجة كهرومغناطيسية ترددها • هو:

$$\nu = \frac{\Delta E}{h} = \frac{1}{h}\cdot\left(E_{high} - E_{low}\right) = \frac{1}{h}\cdot\left(\frac{-AZ^2}{n_{high}^2} - \frac{-AZ^2}{n_{low}^2}\right) = \frac{AZ^2}{h}\cdot\left(\frac{1}{n_{low}^2} - \frac{1}{n_{high}^2}\right)$$

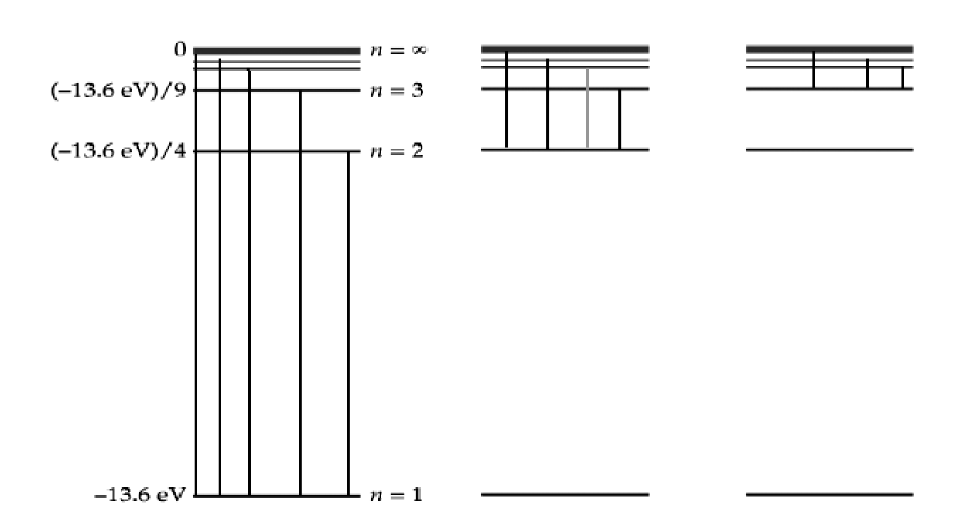
$$\text{From} \qquad \nu\cdot\lambda = c \qquad \Rightarrow \qquad \frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c}$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c} = \frac{AZ^2}{c\,h}\cdot\left(\frac{1}{n_{low}^2} - \frac{1}{n_{high}^2}\right)$$

$$\text{For Hydrogen atom}: \quad Z = 1 \qquad \Rightarrow \quad \frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c} = \frac{A}{c\,h}\cdot\left(\frac{1}{n_{low}^2} - \frac{1}{n_{high}^2}\right)$$

عند مقارنة المعادلة الأخيرة بمعادلة ريدبيرج نجد أنّهما متطابقتان وأنّ ثابت ريدبيرج ما هو إلاّ: $R = \dfrac{A}{hc}$ (تأكّد من قيمة R وقارنها بالقيمة المعطاة في الصفحة 21).

يمثّل الرسم التالي ما يسمّى بسلاسل ليمان وبالمر وباشن (Lyman, Balmer and Paschen series) والخاصّة بالطيف الذرّيّ للهيدروجين. نلاحظ أنّه في سلسلة ليمان ينبعث الضوء نتيجة رجوع الإلكترون من حالته المثارة إلى المستوى الأول (n=1) ويكون الضوء المنبعث من الأشعة فوقالبنفسجية. في سلسلة بالمر يكون رجوع الإلكترون إلى المستوى الثاني (n=2) وتكون الأشعة المنبعثة مرئية. أمّا في سلسلة باشن فتكون الأشعة المنبعثة تحت حمراء حيث يكون الرجوع إلى المستوى الثالث (n=3).



Paschen Series	Balmer Series	Lyman series
Ends at n=3	Ends at n=2	Ends at n=1
Infra-red	visible	UV

تدريب (8): احسب الطول الموجي لأقصر وأطول أشعّة منبعثة في سلسلة بالمر!

نستخدم معادلة ريدبيرج لحساب الطول الموجي ونعوّض nlow=2، حيث أن سلسلة بالمر تنتهي دوماً برجوع الإلكترون إلى المستوى الثاني. نتذكّر أيضاً أنّ سلسلة بالمر تتعلق بذرة الهيدروجين (Z=1).

أقصر أشعة في سلسلة بالمر هي التي تكون طاقتها أعلى ما تكون وتختص بالانتقال من n=∞ إلى n=2(انظر الرسم أعلاه). أمّا الأشعة الأطول في السلسلة فهي التي تكون طاقتها أقل ما يمكن وتختص بالانتقال منn=3 إلى n=2(انظر الرسم أعلاه).

$$\frac{1}{\lambda} = R \cdot \left(\frac{1}{n_{low}^2} - \frac{1}{n_{high}^2} \right)$$

$$\frac{1}{\lambda_{\min}} = R \cdot \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{\infty^2} \right) = \frac{R}{4}$$

$$\Rightarrow \quad \lambda_{\min} = \frac{4}{R} = \frac{4}{1.09678 \times 10^7 \ m^{-1}} = 3.647 \times 10^{-7} \ m = 364.7 \ nm$$

$$\frac{1}{\lambda_{\max}} = R \cdot \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right) = \frac{5R}{36}$$

$$\Rightarrow \quad \lambda_{\max} = \frac{36}{5R} = \frac{36}{5 \times 1.09678 \times 10^7 \ m^{-1}} = 6.565 \times 10^{-7} \ m = 656.5 \ nm$$

تدريب (9): احسب الطول الموجي لأقصر وأطول أشعّة منبعثة في سلسلة ليمان وفي سلسلة باشن!

تدريب (10): احسب طاقة تأيين (Ionization energy) ذرّة هيدروجين في حالة الاستقرار، ثُمّ حدّد أي جزء من الإشعاعات قادر على تأيين ذرة الهيدروجين.

كَوْنُ ذرة الهيدروجين في حالة الاستقرار يعني أنّ الإلكترون موجود في مستوى الطاقة الأقلّ، أي n=1. أمّا التأيين فهو طرد الإلكترون خارج مجال تأثير النواة ممّا يعني نقله إلى المستوى n=∞.

$$\Delta E = A\,Z^2 \cdot \left(\frac{1}{n_{low}^2} - \frac{1}{n_{high}^2} \right) = A \cdot \left(\frac{1}{n_{low}^2} - \frac{1}{n_{high}^2} \right)$$

$$A = 2.18 \times 10^{-18}\ J$$

$$\Delta E = 2.18 \times 10^{-18} \cdot \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{\infty^2} \right) = 2.18 \times 10^{-18}\ J = I.E.$$

$$\Delta E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \qquad \Rightarrow \qquad \lambda = \frac{hc}{\Delta E}$$

$$\lambda = \frac{6.6 \times 10^{-34} \times 3.0 \times 10^{8} \quad Js\,ms^{-1}}{2.18 \times 10^{-18}\ J} = 9.08 \times 10^{-8} m = 90.8\ nm$$

$$Any\ \lambda \le 90.8\,nm \quad will\ ionize\ the\ H-atom.$$

تدريب (11): احسب الطاقة الحركيّة للإلكترون المتأيّن من ذرة هيدروجين مستقرّة تَمّ تعريضُها لأشعة ذات طول موجي مقداره 60 nm.

بالرجوع إلى التدريب (10) نلاحظ أنّ طاقة الفوتون الساقط على ذرّة الهيدروجين أعلى من الطاقة اللازمة لتأيين الإلكترون. سيأخذ الإلكترون ما يحتاجه من طاقة ليتأيّن ويستفيد من الباقي كطاقة حركية.

الطاقة الحركية للإلكترون المتأيّن = طاقة الفوتون الساقط - طاقة التأيّن (K=h••••I.E.)

حقّقت نظرية بور نجاحاً باهراً في تفسير طيف ذرّة الهيدروجين، ولكنّها في المقابل أخفقت إخفاقاً كبيراً عندما حاول بور أن يطبقها على أطياف العناصر الأخرى، وقد أمضى بور سنوات طويلةً بعد ذلك محاولاً تطويرها دونما نجاح. كما حاول علماء آخرون مثل زومرفلد (Sommerfeld) وهايزنبرج (Heisenberg) تطوير نظرية بور فقام الأول بجعل مدارات دوران الإلكترون إهليلجية (elliptical) وسمح الثاني لـn بأن تأخذ أعداداً نصف صحيحة، وبالفعل أحدث هذا التطوير تحسيناً طفيفاً إلاّ أنّه لم يكن مرضياً البتّة.تبيّن فيما بعد أنّ نموذج بور لا يصلح إلاّ للذرّات التي تحتوي على إلكترون واحد وهي ذرّة الهيدروجين وشبيهات ذرّة الهيدروجين أمثال $He^{+}, Li^{2+}, Be^{3+}, B^{4+}$....

ولادة ونشأة ميكانيكا الكمّ

1) تاريخ:

مضى ما يزيد عن سبع سنين على نظرية بور (أو نظرية الكم القديمة كما تسمّى أيضاً) وهي لا تزال في بداية العقد الثاني من القرن العشرين تُرواح مكانها دون تقدّمٍ ملموس يتماشى مع إنجازات الفيزياء من الناحية التجريبية. كان هذا الأمر ممّا أرّق العالم الشاب هايزنبرج (22 سنة) والذي اعتقد أنّه قد آن الأوان لنقلة نوعيّة وتغيير جذري في نمط التفكير.

كان هايزنبرج يرى أنّ المشكلة الحقيقية في نظريّة بور هي تلك المسارات التي نفرض أنّ الإلكترون يدور فيها، فهي ممّا لا يمكن للباحثين التأكّد منه تجريبيّاً، وبدلاً من الاعتماد على مثل هذه الفرضيات "التقليدية" اقترح هايزنبرج الاهتمام أكثر بما يمكن أن يقاس بالتجربة. عكف هايزنبرج على وضع الأسس الرياضية لفكرته، وبالفعل قام بتقديمها، قبل ذهابه في رحلة علميّة طويلة في العام 1923، مكتوبةً لرئيسه في العمل ماكس بورن (MaxBorn) الذي وضعها في الإطار الرياضي الصحيح وقام بنشرها مباشرة. كانت تلك أوّل مرّة يظهر فيها مصطلح ميكانيكا الكمّ (Quantum mechanics).

لم تَلْقَ ميكانيكا الكمّ حماساً لدى الفيزيائيين، فقد كانت مغرقةً في التجريد لا يكاد المتعامل معها يستطيع أن يتخيّل بها أيّ شيء، كانت مجرّد أرقام ومصفوفات! صحيح أنّها تعطي نتائج صحيحة ولكنّها أشبه بآلة لا يُعرف كيف تعمل، تعطيها المعطيات فتعطيك النتائج. كان الفيزيائيون -الجيل القديم منهم بالذات- بحاجة إلى أشياء ملموسة أو على الأقل قابلة للتخيّل، وكان شرودنجر (Schrödinger) أحد هؤلاء الفيزيائيين القدامى فأخذ يبحث عن مسلك أقل تجريداً وأكثر قبولاً من ميكانيكا هايزنبرج وبورن (والتي عرفت فيما بعد بميكانيكا المصفوفات Matrix mechanics لاعتمادها من الناحية الرياضية على المصفوفات)،

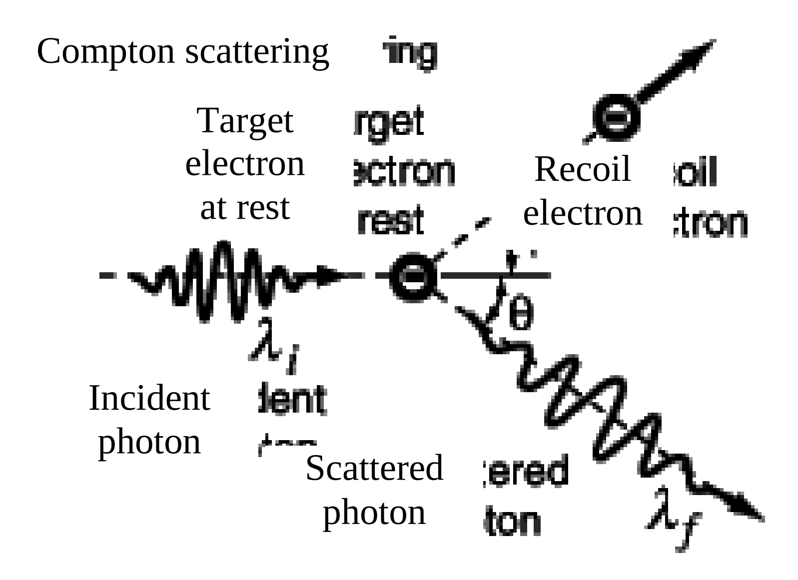
فكان أنْ وجد شرودنجر ضالّته المنشودة في فرضية دو بروليّ (De Broglie) واضعاً بذلك الأساس لما عرف فيما بعد بميكانيكا الأمواج (Wave mechanics).

2) فرضيّة دو بروليّ

في بداية القرن التاسع عشر كان النقاش محتدماً بين الفيزيائيين على طبيعة الضوء، موجات هو أم جسيمات؟ انحسم النقاش (مؤقّتاً) بتجربة يونغ (Young) والتي برهن فيها على أن الأشعة الضوئية الصادرة من مصدرين مختلفين تتداخل مع بعضها تداخلات هدّامة وبنّاءة (constructive & destructive interference) وأنّه لا يمكن تفسير هذه الظاهرة إلاّ إذا اعتُبر الضوء موجاتٍ.

في المقابل لا يمكن تفسير نتائج تجارب التأثير الضوئي إلاّ إذا اعتبر الضوء جسيمات صغيرة (سمّيناها الفوتونات). كما أكّدت التجارب التي أجراها كومبتون (Compton) في العام 1922 أنّ الفوتونات هذه جسيمات حيث أنّها تملك عزماً (زَخَماً momentum)، فعند اصطدام الضوء بجسيمات خفيفة كالإلكترونات مثلاً فإنّ الإلكترونات تغيّر مسارها، كما أنّ الضوء الساقط على هذه الالكترونات يتغيّر طوله الموجي حسب ما يقتضيه قانون حفظ العزم،

ممّا يشير أنّ "جسيمات" الضوء نقلت جزءاً من عزمها إلى الالكترونات وفقدت بذلك جزءاً من طاقتها فطالت موجتها (تصادم مرن elasticcollision).



نظر عالم الرياضيات دو بروڵي متأمّلاً في هذه التجارب المتعلّقة بطبيعة الضوء والتي تشير إلى أنّ الضوء ذو طبيعة ثنائية، فتارةً يمكن اعتباره موجة وتارةً يمكن اعتباره جسيمات وتساءل فيما إذا كان من الممكن أن يُوسّع مفهوم الطبيعة الثنائية ليشمل الجسيمات الأخرى مثل الالكترونات على سبيل المثال. ولكن ما الذي يمكن أن يربط بين الأمواج والجسيمات؟

قدّمت النظرية النسبية لآينشتاين جواباً مقنعا للسؤال الفائت: إنّها الطاقة! فالكتلة – وهي صفة من صفات الأجسام- ما هي إلاّ شكل من أشكال الطاقة، وقد لخّص آينشتاين هذه الحقيقة في معادلته المشهورة والتي تقرّر أنّ محتوى طاقة أيّ جسم يساوي كتلة ذلك الجسم مضروباً بمربّع سرعة الضوء. وحيث أنّ الفوتون له طاقة، فهو ولا شكّ له كتلة وبالتالي له عزم (تذكّر أنّ العزم يساوي الكتلة مضروبةً بالسرعة :(p=m×v

$$E = mc^2 = (mc)\cdot c = p\cdot c$$

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$$p\cdot c = \frac{hc}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

حسب ما تقتضيه معادلة دو بروليّ (المعادلة الأخيرة) فإنّ أيّ جسمٍ يتحرك يمكن اعتباره موجة!! حتّى الأجسام الضخمة يمكن أن نعتبرها موجة!!!!

تدريب (1): احسب طول الموجة التي يمثّلها لاعب كرة قدم كتلته 60 كغم يتحرّك في الملعب بسرعة 10 كم/ساعة؟

$$v = 10\,km/h = \frac{10000\,m}{3600\,s} = 2.778\,m/s$$

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6.6 \times 10^{-34}\ Js\ \ s}{60 \times 2.778\ \ kg\,m} = 3.96 \times 10^{-35} m$$

نلاحظ في المثال السابق أنّ طول هذه الموجة التي يمثّلها اللاعب ضئيلة جدّاً بحيث لا تحمل أيّ معنى. ولهذا فإنّ الطبيعة الموجيّة لمثل هذه الأجسام الكبيرة لن تظهر أبداً للعيان ولهذا لا يحصل "تداخل" بين لاعبي كرة القدم في الملعب بنّاءً كان أم هدّاماً.

تدريب (2): احسب كتلة فوتون طوله الموجي 450 nm.

تدريب (3): احسب الطول الموجي لإلكترون واقع تحت تأثير جهد كهربائي مقداره 100 V.

تتحوّل طاقة الوضع الكهربائية كلّيّةً إلى طاقة حركة:

$$E_{potential} = E_{kinetic}$$

$$e \times V = \frac{1}{2} m_e v^2$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \times e \times V}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \times (1.6 \times 10^{-19}) \times 100 \quad VAs}{9.11 \times 10^{-31} \quad kg}} = 5926738.98\ m/s$$

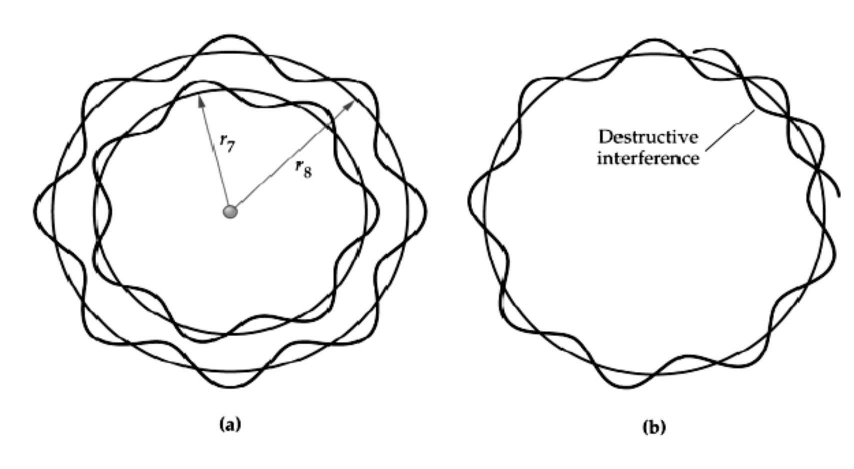
$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6.6 \times 10^{-34}\, J\,s \qquad s}{(9.11 \times 10^{-31}) \times 5926738.98 \quad kg\,m} = 1.22 \times 10^{-10}\, m = 1.22\ Angstrom$$

واضح من جواب السؤال السابق أنّ الطول الموجي للإلكترون المتسارع يقع ضمن أشعّة إكس(X-ray)، ومن المعروف أنّ أشعّة إكس تستخدم في تحديد البناء البلوري للأجسام الصلبة، فهل يمكن استخدام الإلكترونات المعجّلة بدلاً من أشعة إكس لهذا الغرض؟

في العام 1927 قام العالمان ديفيسون (Davisson) وجرمر (Germer) بإجراء تجارب حيود (Diffraction) لإلكترونات معجّلة باتجاه صفيحة من النيكل، وقد وجد العالمان أنّ هذه الإلكترونات عند اصطدامها بصفيحة النيكل يحدث لها حيود وينتج عنها أمواج تتداخل فيما بينها تداخلات هدّامة وبنّاءة تؤدّي إلى ظهور "نمط حيود" تماماً كالذي تنتجه أشعّة إكس. لقد استطاع العالمان تأكيد فرضية دو بروليّ وإثبات أنّها ليست وهماً رياضيّاً بل حقيقة عمليّة. ومن الجدير بالذكر أنّ المايكروسكوب الإلكتروني يعتمد في مبدأ تشغيله على حقيقة أنّ الإلكترونات هي أمواج.

من الواجب ذكره في هذه المرحلة أنّ فرضيّة دو بروليّ قدّمت تفسيراً علميّاً لبعض مسلّمات نظرية بور. فبور لم يقدّم أيّ تفسير لماذا يجب أن يكون العزم الزاويّ من مضاعفات $h/2\pi$، ولماذا تكون الالكترونات في مدارات محدّدة، كما أنّه لم يقدّم تفسيراً حقيقيّاً لماذا لا تُصدر الإلكترونات أشعّةً كهرومغناطيسيّة عند دورانها حول النواة. وسنوجز فيما يلي نتائج فرضيّة دو بروليّ فيما يخصّ نظرية بور:

يوضّح الرسم التالي أنّ محيط المدار الموجود فيه الإلكترون يجب أن يكون من مضاعفات الطول الموجي لذلك الإلكترون وإلاّ تداخلت موجة الإلكترون مع بعضها تداخلاً هدّاماً ممّا يؤدّي إلى فناء الالكترون (b). من هذا نستنتج أنّ هناك مدارات محدّدة يتواجد فيها الإلكترون.



رياضيّاً يكتب الشرط أعلاه على النحو التالي:

$$2\pi r = n\lambda$$

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

$$2\pi r = n\frac{h}{mv}$$

$$mvr = L = n\frac{h}{2\pi}$$

ومنه يتبيّن أنّ العزم الزاويّ من مضاعفات h/2π.

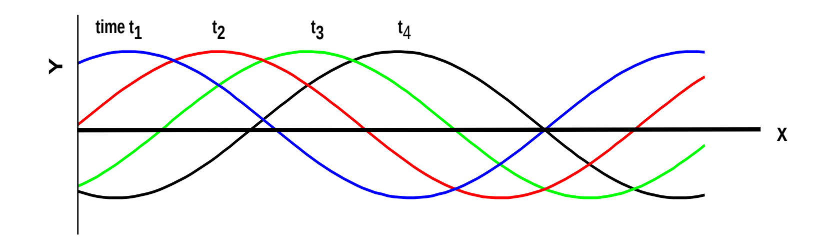
لا تصدر الإلكترونات خلال دورانها حول النواة موجات كهرومغناطيسيّة لأنّها تكون في طبيعتها الموجيّة، فهي موجة لا شحنة متحرّكة.

3) معادلة شرودنجر

ولكن إذا كان الإلكترون موجة، فكّر شرودنجر، فإنّنا ولا شكّ نستطيع أن نطبق عليه معادلة الموجات:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

المعادلة السابقة هي معادلة موجة في بُعدٍ واحد، بمعنى أنّ الموجة تتحرّك فقط في اتّجاهٍ واحد، وليكن في اتّجاه محور السينات x-axis. تمثّل c في المعادلة أعلاه السرعة التي تتحرّك بها الموجة والتي تساوي سرعة الضوء في حالة الأمواج الكهرومغناطيسيّة. أمّا y فتسمّى الإزاحة. ولتوضيح معنى الإزاحة وتأثّرها بالزمن t والمسافة x التي تقطعها الموجة نتأمّل في الموجة الناتجة عن إلقاء حجر في بركة ماء، والمتمثّلة بـ"القمم والوديان" التي تبدأ بالتحرك بعيداً عن مركز إلقاء الحجر.



تسمّى الموجة الناتجة من إلقاء حجر في الماء موجةً عرضيّة لأنّ جزيئات الماء لا تتحرّك باتّجاه الموجة(x) وإنّما تكون حركتها عموديّةً على اتّجاه الموجة، فالجزيئات تتحرّك إلى الأعلى وإلى الأسفل في الاتّجاه y، ويطلق على المسافة التي تقطعها الجزيئات فوق وتحت مستوى الماء الساكن (مستوى الصفر) قبل إلقاء الحجر مصطلح الإزاحة وتكون الإزاحة سالبة إذا كانت الجزيئات تحت مستوى الماء الساكن وموجبةً إذا كانت فوقه. ونلاحظ من الرسم أعلاه أنّ مقدار الإزاحة يعتمد على أمرين اثنين: الأول هو بعد الجزيئات، x، عن مركز الموجة (موضع إلقاء الحجر) والثاني هو الزمن، t، بعد إلقاء الحجر.ت

فنرى في الرسم أنّه عند نقطة زمنيّة محدّدة (t1 مثلاً) تختلف قيمة الإزاحة y بحسب قيمة x، كما وأنّه عند قيمة محدّدة لـ x فإنّ الإزاحة تتغيّر مع مرور الزمن (من t1 إلى t4)[1].

اقترح شرودنجر أن يُعوّض في معادلة الأمواج بدلاً من الإزاحة دالّة أخرى تمثّل الموجة الإلكترونيّة وأعطيت هذه الدالّة الرمز •، وتسمّى أيضاً الدالّة الموجيّة:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2}$$

من الناحية الرياضيّة فإنّ المعادلة أعلاه هي معادلة تفاضليّة جزئيّة من الدرجة الثانية، ويأخذ الحلّ العام لمثل هذه المعادلات الشكل التالي:

$$\psi(x,t) = C\,e^{i(kx - Qt)}$$

وبالنسبة للموجات فإنّ:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \qquad Q = \omega = 2\pi\nu \qquad C = amplitude$$

1. الموجات الكهرومغناطيسيّة هي كذلك موجات عرضيّة مع الاختلاف أنّه لا توجد جزيئات تتحرّك وإنّما الإزاحة تكون في مقدار الحقل الكهربائي وكذلك الحقل المغناطيسي للموجة الكهرومغناطيسية.

يتمّ الآن تعويض الطول الموجي للإلكترون من معادلة دو بروليّ وتردد موجته من معادلة بلانك:

$$\lambda = \frac{h}{p} \qquad \Rightarrow \qquad k = \frac{2\pi p}{h}$$

$$\upsilon = \frac{E}{h} \qquad \Rightarrow \qquad Q = \frac{2\pi E}{h}$$

تصبح بذلك الدالة •على النحو التالي:

$$\psi(x,t) = C \cdot e^{2\pi i x p_x / h} \cdot e^{-2\pi i E t / h} \qquad .....(2.1)$$

$$\psi(x,t) = \psi(x) \cdot \phi(t)$$

$$\psi(x) = C \cdot e^{2\pi i x p_x / h} \qquad \phi(t) = e^{-2\pi i E t / h} \qquad ...(2.2)$$

نلاحظ أنّه في المعادلة الأخيرة تمّ قصر p على مركّبتها في البعد x (px) حيث أنّ الموجة موجودة فقط في البعد x. كما نلاحظ أنّنا قمنا بتقسيم الدالة الكلّيّة إلى دالّتين فرعيّتين، إحداهما تعتمد فقط على المكان (x) والأخرى تعتمد فقط على الزمن (t).

نقوم الآن باشتقاق الدالة الكلية بالنسبة للزمن:

$$\frac{\partial \psi(x,t)}{\partial t} = C \cdot e^{2\pi i x p_x / h} \cdot \left(-\frac{2\pi i E}{h} e^{-2\pi i E t / h} \right)$$

$$\frac{\partial \psi(x,t)}{\partial t} = -\frac{2\pi i E}{h} \cdot \psi(x,t)$$

$$-\frac{h}{2\pi i} \frac{\partial [\psi(x,t)]}{\partial t} = E \psi(x,t)$$

نرمز للعملية الرياضية على يسار المعادلة الأخيرة والتي أخضعت لها الدالة الكلية بالرمز $\hat{H}$، وتصبح المعادلة على النحو التالي:

$$\hat{H} \equiv -\frac{h}{2\pi i} \frac{\partial}{\partial t} \qquad \text{..........(2.3)}$$

$$\Rightarrow \qquad \hat{H} \psi(x,t) = E \psi(x,t)$$

نتنبّه إلى أنّه لا يمكننا "شطب" • من طرفي المعادل ة $\hat{H}$ ليست شيئاً مستقلاً بل هي عملية رياضية مثل عملية إيجاد الجذر التربيعي في المعادلة 1×1=1√، إذ لا يمكننا أن "نشطب" الواحد من كلا الطرفين

ونحصل على 1= √. نرمز بشكلٍ عام لأي عملية رياضية بحرف لاتيني كبير فوقه "قبّعة"($\hat{O}$) ويسمّى مؤثّراً رياضيّاً (mathematicaloperator). وحسب المعادلة الأخيرة فإنّ $\hat{H}$ هي المؤثّر الرياضي الذي إذا أُخضعت له الدالة الكلية فإنّه يُنتِج نفس الدالة مضروبة بالطاقة، وتسمّى $\hat{H}$ لذلك بالمؤثّر الهاميلتوني.

4) المؤثّرات في ميكانيكا الكمّ

تلعب المؤثّرات الرياضية دوراً مركزيّاً في ميكانيكا الكمّ، فهي تمكّننا من معرفة أيّة صفة فيزيائية للنظام الذي ندرسه. كلّ ما علينا القيام به هو معرفة الدالّة • التي تصف النظام ومن ثَمّ نقوم بتشغيل المؤثر الرياضي الخاص بتلك الصفة على الدالة • لنحصل على قيمة الصفة الفيزيائية التي نرغب في معرفتها.

لنقل مثلاً إنّنا نريد معرفة العزم، p، لنظامٍ ما، ولنفرض أنّ المؤثر الرياضي الخاص بالعزم معروف لدينا وليكن $\hat{p}$. في حالة العزم بالذات، سنجد أنّ تشغيل المؤثر $\hat{p}$ على الدالة • ينتج الدالة •مضروبة بالعزم، أي:

$$\hat{p}\psi = p\psi \qquad (2.4)......$$

ولكن كيف نعرف كُنْهَ المؤثر $\hat{p}$ ؟ للإجابة عن هذا السؤال نقوم باشتقاق الدالة الكلّية ••x•t• بالنسبة لـ x:

$$\frac{\partial\psi(x,t)}{\partial x} = C\cdot e^{-2\pi iEt/h}\left(2\pi i\frac{p_x}{h}\cdot e^{2\pi ixp_x/h}\right) = 2\pi i\frac{p_x}{h}\psi(x,t)$$

$$\frac{h}{2\pi i}\frac{\partial\psi}{\partial x} = p_x\psi \qquad \Rightarrow \hat{p}_x = \frac{h}{2\pi i}\frac{\partial}{\partial x} \qquad ....(2.5)$$

المعادلة الأخيرة إذاً، تعطينا مقدار المؤثّر الخاص بالمركّبة السينية للعزم. بنفس الطريقة نحصل على المؤثّرين الخاصّين بالمركّبتين الأخريين للعزم:

$$\hat{p}_y = \frac{h}{2\pi i}\frac{\partial}{\partial y} \qquad \hat{p}_z = \frac{h}{2\pi i}\frac{\partial}{\partial z}$$

وعلى هذا فإنّ المؤثّر الخاص بالعزم الكلّيّ هو:

$$\vec{p} = \vec{p}_x + \vec{p}_y + \vec{p}_z$$
$$\hat{p} = \hat{p}_x + \hat{p}_y + \hat{p}_z$$
$$\hat{p} = \frac{h}{2\pi i}\left(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}\right)$$

في الغالب نستطيع معرفة المؤثّر الخاص بأية صفة فيزيائية وذلك من القانون الفيزيائي التقليدي الخاص بتلك الصفة. لنقل مثلاً أنّنا نريد معرفة المؤثّر الخاص بطاقة الحركة. نعرف من الفيزياء التقليدية أنّ طاقة الحركة تساوي:

$$E_{kinetic} = K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{p^2}{2m}$$

$$\hat{K} = \frac{\hat{p}^2}{2m} = -\frac{h^2}{8m\pi^2}\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right) = -\frac{h^2}{8m\pi^2}\nabla^2$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} = \nabla^2 \qquad \textit{Laplacian Operator}$$

بالإضافة للمؤثّرات الرياضية الخاصة بالعزم وطاقة الحركة نذكر أيضاً المؤثّرين التاليين:

الصفة الفيزيائية	رمزها	المؤثر
الموقع (المكان)	x	x
طاقةالوضع	V	V

بإمكاننا الآن تحديد المؤثّر الخاص بالطاقة الكلّيّة للنظام والمتمثّلة بمجموع طاقتي الوضع والحركة. هذا المؤثّر هو المؤثّر الهاميلتوني:

$$E_{total} = E_{kinetic} + E_{potential} = K + V$$

$$\hat{H} = \hat{K} + \hat{V} = -\frac{h^2}{8m\pi^2}\nabla^2 + V \qquad ......(2.6)$$

بمقارنة المعادلتين (2.6) و(2.3) نستنبط أنّ:

$$\hat{H} = -\frac{h^2}{8\pi^2 m}\nabla^2 + V(x,y,z,t) = -\frac{h}{2\pi i}\frac{\partial}{\partial t}$$

$$\left[-\frac{h^2}{8\pi^2 m}\nabla^2 + V(x,y,z,t)\right]\psi(x,y,z,t) = E\psi(x,y,z,t) = -\frac{h}{2\pi i}\frac{\partial \psi(x,y,z,t)}{\partial t} \qquad .....(2.7)$$

من الواجب ذكره بالنسبة للمؤثّرات أنْ ليس كلّ الصفات الفيزيائيّة تنطبق عليها المعادلة (2.4). نميّز هنا بين حالتين:

الصفة الفيزيائية تنطبق عليها المعادلة (2.4)، أي أنّ

$$\hat{F}\psi = F\psi$$

حيث أنّ $\hat{F}$ هو المؤثر الخاص بالصفة الفيزيائية F. في هذه الحالة فإننا عندما نقوم بقياس القيمة الفيزيائية F، نحصل في كلّ مرّة على نفس القيم المحدَّدَة للصفة F، وحسب ما تحدده المعادلة.•الطاقة والعزم من هذه الصفات.

الصفة الفيزيائية لا تنطبق عليها المعادلة (2.4). في هذه الحالة فإنّنا عندما نحاول قياس F، فإنّنا كلّ مرة نقوم فيها بالقياس نحصل على قيمة مختلفة بعض الشيء عن التي قبلها ممّا يعني أنّ هناك توزيعاً إحصائياً لقيم F، عندها نستطيع حساب متوسط حسابي أو ما يسمّى بالقيمة المتوقّعة (expectation value) لقيم F على النحو التالي:

$$\overline{F} \equiv < F > = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \psi^* \hat{F} \psi \, d\tau}{\int_{-\infty}^{+\infty} \psi^* \psi \, d\tau} \qquad (2.8)........$$

•• هي الدالة القرينة (conjugate function) بالنسبة للدالاّت المركبة (complex functions) والتي تحتوي على العدد التخيّلي i. ويتمّ تعويضها في المعادلة إذا كانت الدالة مركّبة، أمّا إذا كانت الدالة • حقيقية فإنّ الدالة القرينة •• هي نفس الدالة •، ••••.

[تكتب الأعداد المركبة على الصورة a+bi حيث أنّ a و b هي أعداد حقيقية و i هي $\sqrt{-1}$. عند تربيع هذا العدد فإنّ i لا تختفي(a+bi)(a+bi)=a2+2abi-b2، أمّا إذا ضربنا (a-bi)بـ(a+bi) فإنّنا نحصل على (a2-b2) ويختفي بذلك العدد التخيّلي i. يُسمّى (a-bi) بالعدد القرين لـ (a+bi). وبنفس الطريقة فإنّ الدالة (e-iy) هي القرينة للدالة (eiy• لأنّ حاصل ضربهما يؤدي إلى اختفاء i بخلاف ما إذا ضربت الدالة بنفسها.]

هناك صفات عديدة هامّة فيما يخصّ المؤثّرات تشترطها ميكانيكا الكم لا مجال الآن لذكرها ولكن تجدر الإشارة إلى صفة التبادليّة في المؤثّرات لما يترتّب عليها من أهمّية. لنفرض أنّ المؤثر $\hat{F}$ هو المؤثر الخاص بالصفة الفيزيائية F، وأنّ المؤثر $\hat{O}$ هو المؤثر الخاص بالصفة الفيزيائية O؛ يكون المؤثّران تبادليّين إذا تحقّق الشرط التالي:

$$\hat{F}\left(\hat{O}\psi\right)=\hat{O}\left(\hat{F}\psi\right)$$

بمعنى أنّه لا فرق فيما إذا "شُغِّل" المؤثّر $\hat{O}$ أوّلاً على الدالة • ومن ثَمّ "شُغِّل" المؤثّر $\hat{F}$ على الناتج أو العكس (مثل 3×5=5×3). في مثل هذه الحالة يمكن قياس الصفتين الفيزيائيتين F و • في نفس الوقت بدقة. أمّا إذا لم يتحقّق شرط التبادليّة فلا يمكن قياس الصفتين في نفس الوقت بدقّة وإنّما تكون مَعْرِفة صفة على حساب معرفة الأخرى.

5) عَوْدٌ إلى معادلة شرودنجر وصفات الدالة الموجية

تسمّى المعادلة (2.7) معادلة شرودنجر المعتمدة على الزمن (time-dependent).في حالات كثيرة يكون النظام مستقراً (stationary) ممّا يعني أنّ النظام لا يتغيّر مع الزمن، عندها تكون الدالة الفرعية (t)•ثابتة لا متغيرة ويمكن بالتالي حذفها من طرفي المعادلة لنحصل على معادلة شرودنجر غير المعتمدة على الزمن (time-independent) (2.9):

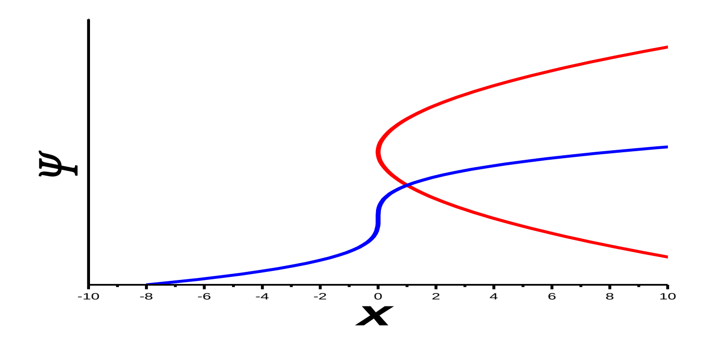
$$\left[-\frac{h^2}{8\pi^2 m}\nabla^2+V(x,y,z,t)\right]\psi(x,y,z,t)=E\psi(x,y,z,t)$$

$$\left[-\frac{h^2}{8\pi^2 m}\nabla^2+V(x,y,z,t)\right]\psi(x,y,z)\phi(t)=E\psi(x,y,z)\phi(t)$$

$$\left[-\frac{h^2}{8\pi^2 m}\nabla^2+V(x,y,z)\right]\psi(x,y,z)=E\psi(x,y,z) \qquad ....(2.9)$$

تنبع أهمّية معادلة شرودنجر من أنّها -إذا استطعنا حلّها- نحصل على الدالة • والتي بدورها هي مصدر كلّ المعرفة عن صفات النظام الفيزيائية. إلاّ أنّ حلّ معادلة شرودنجر ليس سهلاً كما قد يبدو للوهلة الأولى، بل على العكس تماماً. وفي معظم الأحيان يكون الحلّ مضبوطاً (exact) متعذّراً، الأمر الذي أدّى إلى تطوير طرق حلّ تقريبية لإعطاء جواب تقريبي. وممّا يساعد على الحلّ أنّ هناك شروطاً رياضية يجب توفّرها في الدالة الموجية حتى تكون مقبولة نوجزها فيما يلي:

أ. أن تكون الدالة أحاديّة القيمة (single-valued)، بمعنى أنّه لكلّ قيمة محدّدة من x هنالك قيمة واحدة فقط ﻟ••.• يمثّل الرسم التالي دالّتين، إحداهما أحادية القيمة (الأزرق) والأخرى متعدّدة القيمة (الأحمر) حيث نجد في الأخيرة أنّ هناك قيمتين مختلفتين ﻟ •لنفس القيمة من x، مثلاً x=6.

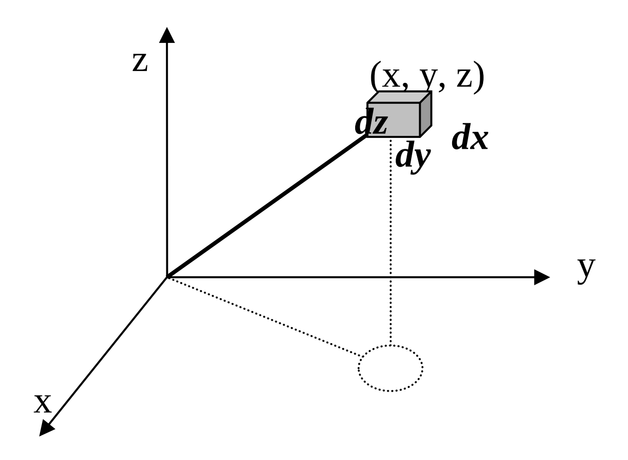


ولكن لماذا يشترط في الدالة الموجية أن تكون أحادية القيمة؟ إنّ الدالة الموجية هي مجرّد دالّة رياضيّة لا تحمل أيّ معنىً فيزيائيّ، وممّا يدل على ذلك أنّ الدالة الموجيّة تحتوي في كثيرٍ من الأحيان على أعداد خياليّة. إلاّ أنّ العالم ماكس بورن أعطى مربّع الدالة الموجيّة •• (أو حاصل ضرب الدالة بقرينتها إنْ كانت مركّبة •••) معنىً فيزيائياً هو احتمالية تواجد الجسم الموصوف بهذه الدالة في نقطة مكانيّة محدّدة (ونقطة زمانيّة محدّدة إذا لم تكن الحالة الموجود فيها ذلك الجسم مستقرّة). فإذا عرفنا الدالة الموجية الخاصة بإلكترون يدور حول نواة ذرة الهيدروجين فإنّنا نستطيع أن نعرف من مربّع الدالة الموجية احتمالية تواجد الإلكترون في الأمكنة المختلفة المحيطة بالنواة. نعبّر رياضيّاً عن هذه الفكرة بالمعادلة التالية:

$$P(x,y,z) = \psi\psi^* d\tau \qquad P(x,y,z) = \psi^2 d\tau$$

$$d\tau = dx \cdot dy \cdot dz$$

حيث أنّ P هي احتمال تواجد الجسم في حجم غير متناه في ضآلته (d•) عند النقطة (x,y,z) في الفضاء.



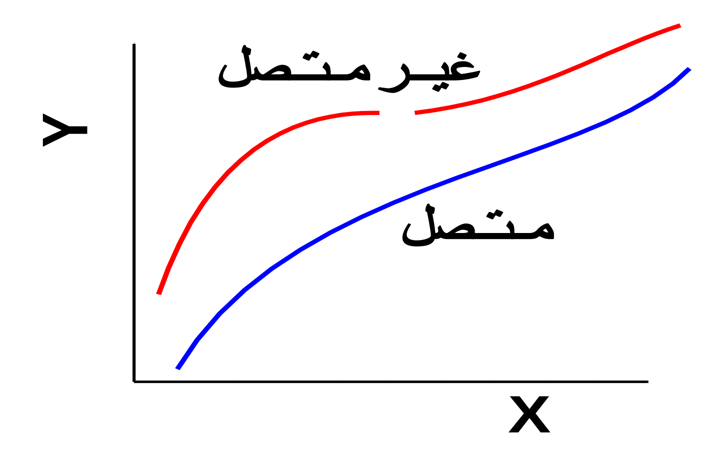
ويطلق أيضاً على مربّع الدالة الموجية ••(•••) مصطلح كثافة الاحتمالية •(probability density) لأنّه حاصل قسمة الاحتمالية على الحجم كما يتّضح من المعادلة السابقة:

$$\psi^2 = \frac{P(x,y,z)}{d\tau} \qquad\qquad \psi\psi^* = \frac{P(x,y,z)}{d\tau}$$

إذا أقررنا بصحة تفسير بورن لمربع الدالة الموجية، وجب أن تكون الدالة الموجية أحادية القيمة، إذ لو كانت متعددة القيمة (قيمتان مختلفتان لـ••) لوجب أن يكون هناك احتمالان مختلفان لتواجد الجسم في نفس النقطة، وهذا بالبداهة مرفوض.

يجب أن تكون الدالة الموجية • متّصلة (continuous)

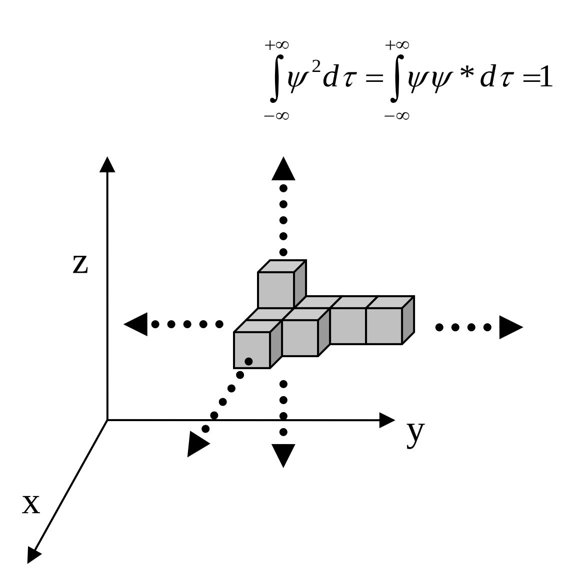
وكذلك أنْ تكون مشتقتها متّصلة، فهذا ممّا يضمن قابلّيتها للاشتقاق وهو ما نحتاجه في معادلة شرودنجر. كما أنّ كون الدالة غير متّصلة يؤدّي إلى كون احتمال تواجد الجسم في نقطة عدم الاتصال غير معرّف.



يجب أن يكون لتكامل مربع الدالة الموجية قيمة معرّفة وليس ما لا نهاية (quadratically integrable). كما أنّ الدالة نفسها يجب أن تكون معرّفة في كلّ نقطة ولا يجوز أن تكون مالانهاية وإلاّ كان احتمال تواجد الجسيم في تلك النقطة مالانهاية وهو أمر غير مقبول فيزيائيّاً.

نتساءل الآن: ما هو احتمال أن نجدَ مثلاً الإلكترون الدائر حول نواة ذرة الهيدروجين في الفضاء الممتدّ إلى المالانهاية؟ نحن لا نشكّ بوجود ذلك الإلكترون، نحن متأكّدون من أنّه موجود في كوننا، وعلى هذا فاحتمال وجوده في الفضاء الممتدّ إلى المالانهاية حول نواة الهيدروجين هو 100% أو 1. وإذا كان احتمال تواجد الإلكترون في الحجم d• الموجود عند النقطة (x,y,z) في الفضاء هو $P(x,y,z)=\psi^2 d\tau$، فإنّ احتمال تواجد الإلكترون في الفضاء الممتدّ إلى المالانهاية هو مجموع احتمالات تواجده في كلّ الأحجام d• المتراصّة حول بعضها مكوّنةً الفضاء إلى المالانهاية. والمجموع في لغة الرياضيات هو التكامل، إذاً

$$\int_{-\infty}^{+\infty}\psi^2 d\tau=\int_{-\infty}^{+\infty}\psi\psi^* d\tau=1$$



تُسمّى المعادلة الأخيرة شرط العيارية (Normalization condition)، وهي السبب فيما اشترط سابقاً من كون مربّع الدالة الموجية قيمة معرّفة لا مالانهاية.

6) شرط التعامد (Orthogonality condition)

عند تشغيل مؤثّر ما ($\hat{O}$) على دالّة ما (f) ويكون ناتج تلك العملية الرياضية هو نفس الدالة f مضروبة بعدد (•)، فإنّ المعادلة التي تمثّل العمليّة أعلاه تسمّى معادلة القيمة المميّزة أو معادلة القيمة الذاتيّة (eigenvalue equation). تسمّى الدالة f الدالة المميزة (أو الذاتيّة) (eigenfunction) للمؤثر $\hat{O}$، كما يسمّى العدد • بالقيمة المميّزة (eigenvalue).

$$\hat{O}\, f = \lambda \cdot f$$

إنّ الهدف من حلّ معادلات القيمة المميزة هو معرفة أي الدالاّت هي دالاّت مميزة للمؤثّر المستخدم، ومن ثَمّ معرفة القيمة المميزة لكل دالّة مميزة. وعندما نقوم بحلّ معادلات القيمة المميزة فإنّنا نحصل على ما لانهاية من الدالاّت التي تصلح لأنْ تكون دالاّت مميزة، وهنا نفرّق بين حالتين:

أنْ يكون لكلّ دالة مميزة قيمة مميزة تختلف عن الأخرى.

أنْ يكون لدالاّت مميّزة مختلفة نفس القيمة المميّزة، وهنا نتكلّم عمّا يسمّى بحالة التفسّخ (degeneracy).

لتوضيح المفاهيم السابقة نتأمّل في معادلة شرودنجر. إنّ معادلة شرودنجر هي معادلة قيمة مميّزة كما هو واضح، حيث أنّ المؤثّر المستخدم هو مؤثّر الطاقة والقيمة المميّزة هي طاقة النظام. ولنكون أكثر تحديداً، نتأمّل في معادلة شرودنجر الخاصّة بذرّة الهيدروجين.

$$\hat{H}\psi = E\psi$$

$$\hat{H}\psi_n = E_n\psi_n$$

يرمز الحرف n الذي تمّت إضافته في المعادلة إلى أنّ هناك عدة دالاّت (n من الدالاّت) تصلح لأن تكون دالات مميّزة، وأنّ هناك قيمة مميّزة من الطاقة لكل دالّة مميّزة. ويوضّح الجدول التالي بعضاً من هذه الدالاّت المميّزة وطاقتها لإلكترون ذرة الهيدروجين:

n	الدالّة المميزة	القيمة المميزة
1	•1s	E1s
2	•2s	E2s
3	•2px	E2p
4	•2py	E2p
5	•2pz	E2p
6	••s	E3s

نلاحظ في الجدول أعلاه أنّ هناك ثلاث دالات مميزة لها نفس القيمة المميزة وهي الدالات الخاصة بالفلك p. نقول إنّ الأفلاك px وpy وpz متفسّخة (degenerate).

في حال الدالاّت المميّزة غير المتفسخة (non-degenerate) ينطبق شرط التعامد: لتكن i• دالة مميزة و j• دالة مميزة أخرى لها قيمة مميزة مختلفة عن تلك التي للدالة i•. ينصّ شرط التعامد على أنّ

$$\int_{-\infty}^{\infty}\psi_j\psi_i\,d\tau=0 \qquad\qquad \int_{-\infty}^{\infty}\psi_j^*\psi_i\,d\tau=0$$

أمّا شرط العياريّة فيكون:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi_i^2 d\tau = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_i^* \psi_i \, d\tau = 1$$

تدريب (4): أيّ من الدالات التالية هي دالّة مميّزة للمؤثّر $\frac{d}{dx}$، وأيّ منها هو دالّة مميّزة للمؤثّر $\frac{d^2}{dx^2}$. احسب القيمة المميّزة إنْ أمكن.

أ. eikx   ب. cos(kx)   ج. k

د. kx   هـ. e-ax2

نسأل أنفسنا: هل تنطبق معادلة القيمة المميّزة على الدالاّت المذكورة؟ نجرّب!

$$\frac{d}{dx}\left(e^{ikx}\right) = ik\, e^{ikx}$$

$$\frac{d}{dx} f = \lambda f$$

$$yes, \quad eigenvalue \ \lambda = ik$$

نكمل الحلّ بنفس الطريقة للدالاّت الأخرى وكذلك للمؤثّر الثاني.

تدريب (5): هل تصلح الدالة eikx لأن تكون دالّة موجيّة؟ وضّح إجابتك!

تدريب (6): أوجد في كلٍّ من الدالات التالية قيمة الثابت A بحيث تكون الدالة عياريّة.

أ. •=Ae-kx (0 ≤ x <∞) ب. •••Asin(ax/L)••• (0 ≤ x ≤ L)

$$\int_0^\infty \left(Ae^{-kx}\right)\cdot\left(Ae^{-kx}\right)dx = 1$$

$$A^2\int_0^\infty e^{-2kx}dx = -\frac{A^2}{2k}\left[e^{-2kx}\right]_0^\infty = -\frac{A^2}{2k}\left[0-1\right] = \frac{A^2}{2k} = 1$$

$$A = \pm\sqrt{2k}$$

تدريب (7): هل تصلح الدالة sin(ax/L) لأن تكون دالّة موجيّة؟ وضّح إجابتك!

تدريب (8): هل الدالّتان 2e-2x و 4e-8x متعامدتان (0 ≤ x <∞)؟ وضّح إجابتك!

7) مبدأ عدم التأكّد لهايزنبرج (Heisenberg Uncertainty Principle)

هل بالإمكان أن نحدد في نفس الوقت مكان وسرعة أي جسم بدقّة كبيرة؟ للإجابة على هذا السؤال نحتاج –حسب قواعد ميكانيكا الكم- إلى معرفة فيما إذا كان المؤثر الخاص بالمكان والمؤثّر الخاص بالعزم (العزم=السرعة مضروبة بالكتلة) تبادليّين، كما قدّمنا عند الكلام على المؤثّرات(ص 37).لنجرّب ذلك على أيّ جسم موصوف بالدالّة الموجية •:

$$\hat{p}_x = \frac{h}{2\pi i}\frac{\partial}{\partial x} \qquad \hat{x} = x$$

$$\hat{x}\left(\hat{p}_x\psi\right) = \hat{x}\left(\frac{h}{2\pi i}\cdot\frac{\partial\psi}{\partial x}\right) = x\frac{h}{2\pi i}\cdot\frac{\partial\psi}{\partial x}$$

$$\hat{p}_x\left(\hat{x}\psi\right) = \hat{p}_x\left(x\psi\right) = \frac{h}{2\pi i}\frac{\partial\left(x\cdot\psi\right)}{\partial x} = \frac{h}{2\pi i}\left(\psi + x\frac{\partial\psi}{\partial x}\right) = \frac{h}{2\pi i}\psi + x\frac{h}{2\pi i}\cdot\frac{\partial\psi}{\partial x}$$

$$\hat{p}_x\left(\hat{x}\psi\right) \neq \hat{x}\left(\hat{p}_x\psi\right)$$

حيث أنّ المؤثّرين غير تبادليين فإنّه لا يمكننا في نفس الوقت أن نحدّد مكان الجسم وعزمه (وبالتالي سرعته) بدقّة كبيرة، فإذا أمكننا تحديد مكانه بدقّة كبيرة فإنّ ذلك يعني أنّنا لا نعرف سرعته بدقة، والعكس صحيح. رياضياً يُعبّر عن هذه العلاقة والتي تسمّى بمبدأ عدم التحديد لهايزنبرج بالمعادلة التالية:

$$\Delta q \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

حيث أنّ q• هو مقدار الخطأ في تحديد الموقع و p• هو مقدار الخطأ في تحديد العزم وبالتالي السرعة.

تدريب (9): عند تحديد سرعة رصاصة كتلتها 1 غم انطلقت من مسدّس كان الخطأ التجريبي في قيمة السرعة المحدّدة 2 m/s•. احسب مقدار الخطأ في تحديد موقع الرصاصة.

$$\Delta p = \Delta(mv) = m \cdot \Delta v$$

$$\Delta q \geq \frac{h}{4\pi\,\Delta p} = \frac{h}{4\pi\, m\,\Delta v}$$

$$\Delta q \geq \frac{6.6\times10^{-34} \quad J\,s}{4\times3.14\times\left(1\times10^{-3}\,kg\right)\times\left(2\times10^{-6}\ ms^{-1}\right)} = 2.6\times10^{-26} m$$

لا شكّ أنّ الخطأ في تحديد موقع الرصاصة ضئيل جدّاً بل ومهمل من الناحية العمليّة، أفلا نستطيع الزعم بأنّ السرعة والموقع قد تمّ بالفعل تحديدهما بدقة كبيرة في نفس الوقت؟ نعم صحيح، ولكن هذه الدقة لا تتحقق إلا مع الأجسام الكبيرة أمّا الأجسام الدقيقة المجهرية (microscopic) فبسبب كتلتها الضئيلة جدّاً يكون الخطأ كبيراً كما يتّضح في المثال التالي:

تدريب (10): حدّد مقدار الخطأ في سرعة إلكترون نعرف أنّه يتواجد ضمن فترة (interval) عرضها 50 pm.

$$\Delta q = 50\ pm = 50\times10^{-12} m$$

$$\Delta v \geq \frac{h}{4\pi\, m\,\Delta q}$$

$$\Delta v \geq \frac{6.6\times10^{-34}\,J\,s}{4\times3.14\times\left(9.1\times10^{-31}\,kg\right)\times\left(50\times10^{-12}\,m\right)} = 1154896\ m/s \approx 1155\,km/s$$

من علاقة عدم التحديد بين السرعة والموقع نستطيع أيضاً أن نستنبط علاقة عدم تحديد بين الطاقة والزمن:

$$q = v \cdot t \qquad \Delta q = v \cdot \Delta t$$

$$E = \frac{1}{2} m v^2 \qquad dE = \frac{2}{2} m v\, dv = v \cdot d(m \cdot v) = v \cdot dp$$

$$\Delta E = v \cdot \Delta p \qquad \Delta p = \frac{\Delta E}{v}$$

$$\Delta q \cdot \Delta p = (v \cdot \Delta t) \cdot \left(\frac{\Delta E}{v} \right) = \Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

ولتوضيح علاقة عدم التحديد بين الطاقة والزمن نضرب المثال التالي: تطلق بعض النظائر المشعة جسيمات ألفا من أنويتها بحثاً عن الاستقرار. جسيمات ألفا هذه جسيمات ثقيلة نسبيّاً إذ إنّها تَعْدِل نواة ذرة الهيليوم (بروتونان ونيوترونان)، ولذلك يمكن تحديد طاقتها عند انطلاقها تاركةً نواة ذلك العنصر المشعّ بدقّة كبيرة، ممّا يعني أنّ E• صغيرة جدّاً. ينتج من علاقة عدم التحديد أنّ t• كبيرة،

وهذا يعني أنّه كلّما كانت معرفتنا بطاقة الجسيمات المنبعثة أدقّ كلّما كان جهلنا بالزمن الذي حصل فيه انبعاث جسيمات ألفا من النواة أكبر. بكلمات أخرى، نحن لا نستطيع أن نتنبّأ بدقّة متى سيحصل انبعاث جسيمات ألفا.

من الواجب تذكّره عند هذه النقطة أنّ مبدأ عدم التحديد لا يقتصر على السرعة والموقع أو الطاقة والزمن بل يشمل أيّة صفتين فيزيائيتين لا يكون المؤثّران الخاصّان بهما تبادليّين. كما يجب التنبّه إلى أنّ عدم قدرتنا على تحديد هذه الصفات الفيزيائية بدقة لا علاقة له بالتقدّم التكنولوجي للبشرية، فعلاقة عدم التحديد هي علاقة مبدئية من أصول ميكانيكا الكم، ومهما عَلَتْ علومنا لن نستطيع أبداً أن نعرف على سبيل المثال سرعة وموقع إلكترون بدقة بالغة في نفس الوقت.

أخيراً نذكر في هذا المجال معادلةً تساعدنا في تقدير الخطأ المصاحب لقياس أيّة قيمة فيزيائية :

$$\Delta F = \sqrt{\overline{F^2} - \overline{F}^2}$$

حيث أنّ $\overline{F^2}$ هو المتوسط الحسابي (معدّل) لمربّع القيمة الفيزيائية ، أمّا $\overline{F}^2$ فهو مربّع معدّل القيمة الفيزيائية، ويمكن حساب كلٍّ منهما بواسطة المعادلة (2.8).

8) ملاحظة أخيرة:

إذا كانت الدالة i• حلاًّ لمعادلة القيمة المميّزة $\hat{F}\psi = F\psi$، وكانت الدالة j• حلاً آخر لنفس المعادلة وبنفس القيمة المميّزة F، فإنّ أيّة تركيبة خطّيّة (linear combination, a•i+b•j) من الحلّين المذكورين هي أيضاً حلّ لنفس المعادلة.

البرهان:

$$\hat{F}\left(a\psi_i + b\psi_j\right) = \hat{F}\left(a\psi_i\right) + \hat{F}\left(b\psi_j\right) = a\hat{F}\psi_i + b\hat{F}\psi_j$$

$$but \qquad \hat{F}\psi_i = F\psi_i \qquad and \qquad \hat{F}\psi_j = F\psi_j$$

$$then \qquad \hat{F}\left(a\psi_i + b\psi_j\right) = aF\psi_i + bF\psi_j = F\left(a\psi_i + b\psi_j\right)$$

$$\therefore \quad a\psi_i + b\psi_j \text{ is an eigenfunction.}$$

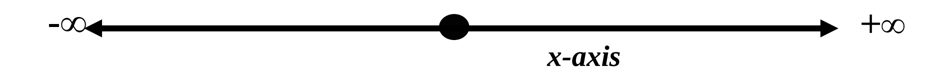
الفصل الثالث عشر

تطبيقات معادلة شرودنجر

لجسيم الحرّ والجسيم في صندوق

الجسيم الحرّ (free particle)

الجسيم الحر هو الجسيم الذي لا توجد قيود على حركته في الفضاء من ∞- إلى ∞+، كما أنّ الطاقة الوضعية لهذا الجسيم V تكون صفراً لعدم وجود قوى تجاذب وتنافر تؤثّر عليه.ولأغراض التبسيط يتمّ قصر المسألة على حركة جسيمٍ حرٍ في بعد واحد، وليكن البعد السيني.



نكتب الآن معادلة شرودنجر الخاصة بهذا الجسيم مع الأخذ بعين الاعتبار أنّ طاقته الوضعية هي صفر وأنّه يتحرّك في البعد السيني فقط:

$$\hat{H}\psi = E\psi$$

$$\left[-\frac{h^2}{8\pi^2 m}\nabla^2 + V(x,y,z)\right]\psi(x,y,z) = E\psi(x,y,z)$$

$$\left[-\frac{h^2}{8\pi^2 m}\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right) + V(x,y,z)\right]\psi(x,y,z) = E\psi(x,y,z)$$

$$-\frac{h^2}{8\pi^2 m}\frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2} = E\psi(x) \qquad (3.1)$$

الحلّ العام لهذه للمعادلة الأخيرة هو $\psi = A\cdot e^{ikx} + B\cdot e^{-ikx}$، وهو تركيبة خطّية من الدالتين $\psi = A\cdot e^{ikx}$ و $\psi = B\cdot e^{-ikx}$ حيث أنّ كلاً من هاتين الدالتين يصلح وحده لأن يكون حلاً لمعادلة القيمة المميزة (3.1).

الحالة الأولى:A=0 أو B=0.

$$B = 0$$

$$\psi = A\cdot e^{ikx} \qquad \frac{\partial\psi}{\partial x} = ik\,A\cdot e^{ikx} \qquad \frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} = i^2 k^2 A\cdot e^{ikx} = -k^2 A\cdot e^{ikx}$$

$$Energy: -\frac{h^2}{8\pi^2 m}\frac{\partial^2\psi(x)}{\partial x^2} = -\frac{h^2}{8\pi^2 m}\left(-k^2 A\cdot e^{ikx}\right) = \frac{h^2 k^2}{8\pi^2 m}\psi = E\psi(x)$$

$$E = \frac{h^2 k^2}{8\pi^2 m} \qquad (3.2)$$

$$Momentum: \quad \hat{p}_x\psi = p_x\psi$$

$$\hat{p}_x\psi = \frac{h}{2\pi i}\frac{\partial\psi}{\partial x} = \frac{h}{2\pi i} ik\,A\cdot e^{ikx} = \frac{hk}{2\pi}\psi = p_x\psi$$

$$p_x = \frac{hk}{2\pi}$$

أمّا إذا تمّ تعويض A=0، فإنّ الطاقة ستكون $E = \frac{h^2 k^2}{8\pi^2 m}$ كما هو الحال مع B=0، أمّا العزم px فسيكون $p_x = -\frac{hk}{2\pi}$ ممّا يعني أن الجسيم يتحرَك في الاتّجاه المعاكس.

من معادلة طاقة الجسيم الحرّ (3.2) نرى أنّ الطاقة غير مكمّاة (not quantized)، إذ لا قيود على قيمة الثابت k ويجوز أن يأخذ أيّة قيمة حقيقيّة. نتساءل الآن: ما هو احتمال أن يكون الجسم في مكان ما غير متناهٍ في ضآلته (dx) على الخط المستقيم؟

$$P = \psi^* \psi \, dx$$
$$\psi^* \psi = (A \cdot e^{ikx})^* (A \cdot e^{ikx}) = (A \cdot e^{-ikx})(A \cdot e^{ikx}) = A^2$$

إنّ احتمال وجود الجسيم على أيّة نقطة في الخط المستقيم الممتد من ∞− إلى ∞+ هو قيمة ثابتة بغضّ النظر عن الموقع نفسه (قيمة x)، بمعنى أنّه لا يوجد مكان يكون احتمال تواجد الجسيم فيه أعلى من مكانٍ آخر. وبكلمات أخرى: نحن لا نستطيع أن نتنبّأ أين سيكون الجسيم على الخط عندما نحاول تجريبياً تحديد مكانه.

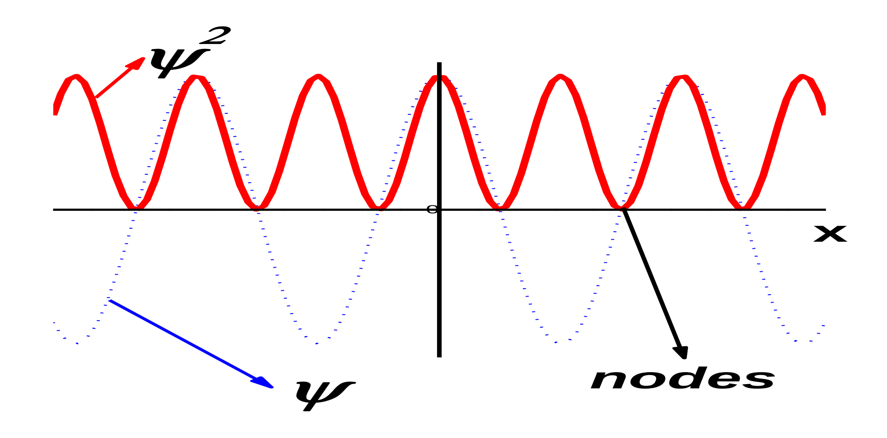
الحالة الثانية: A=B.

$$\psi = A \cdot e^{ikx} + B \cdot e^{-ikx} = A \cdot e^{ikx} + A \cdot e^{-ikx} = A\left(e^{ikx} + e^{-ikx}\right)$$
$$Euler's\ Formula: \quad e^{i(ax)} = \cos(ax) + i\sin(ax)$$
$$\psi = A[\cos(kx) + i\sin(kx) + \cos(-kx) + i\sin(-kx)]$$
$$with \quad \cos(-x) = \cos(x) \qquad and \qquad \sin(-x) = -\sin(x)$$
$$\psi = 2A\cos(kx) \qquad \frac{\partial \psi}{\partial x} = -2kA\sin(kx) \qquad \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = -2k^2 A\cos(kx)$$
$$\hat{H}\psi = -\frac{h^2}{8\pi^2 m}\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \frac{h^2}{8\pi^2 m}2k^2 A\cos(kx) = \frac{h^2 k^2}{8\pi^2 m}2A\cos(kx) = \frac{h^2 k^2}{8\pi^2 m}\psi$$
$$E = \frac{h^2 k^2}{8\pi^2 m}$$

إنّ طاقة الجسيم الحرّ التي نحصل عليها في الحالة الثانية لا تختلف عمّا حصلنا عليه في الحالة الأولى (المعادلة 3.2). ولكن كما سنرى، فإنّ كثافة الاحتمالية مختلفة:

$$P = \psi^* \psi \, dx$$
$$\psi^* \psi = \left[2A \cdot \cos(kx)\right]^* \left[2A \cdot \cos(kx)\right] = 4A^2 \cos^2(kx)$$

يمثّل الرسم أدناه الدالة الموجية •(المنحنى الأزرق) وكثافة الاحتمالية ••• (المنحنى الأحمر) عندما تكون A=B=1/2. نلاحظ أنّ احتمال أن نجدَ الجسيم الحرّ في بعض الأماكن أكبر منه في أماكن أخرى، بخلاف الحالة الأولى عندما كانت B تساوي صفراً، وتمثّل القيمة القصوى في منحنى كثافة الاحتمالية (الأحمر) المواقع التي يكون احتمال أن نجدَ الجسيم فيها أكبرَ ما يمكن.كما نلاحظ من الرسم أنّ هناك مواقعَ على الخط يُحظَر على الجسيم التواجدُ فيها، حيث أنّ كثافة احتمالية تواجد الجسيم في هذه المواقع هي صفر، وتسمّى هذه المواقع العقد (nodes).



لنحاول الآن معرفة العزم من معادلة القيمة المميّزة الخاصّة بالعزم. إذا استخدمنا الدالة الموجية • بصورتها التي تحتوي على جيب التمام ((2Acos(kx) فإنّها لن تعطينا معادلة قيمة مميّزة، وكذلك الأمر إذا استخدمنا التركيبة الخطّيّة الأصلية (Aeikx+Ae-ikx):

$$\hat{p}_x\psi = p_x\psi \qquad \Rightarrow \qquad \frac{h}{2\pi i}\frac{\partial\psi}{\partial x} = p_x\psi$$

$$\psi = 2A\cos(kx) \qquad \Rightarrow \qquad \frac{\partial\psi}{\partial x} = -2A\sin(kx)$$

$$\frac{h}{2\pi i}\frac{\partial\psi}{\partial x} = -\frac{h}{\pi i}A\sin(kx) \qquad (not\ \ eigenvalue\ eq.)$$

$$\psi = A\left(e^{ikx} + e^{-ikx}\right) \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial\psi}{\partial x} = \left(ikAe^{ikx} - ikAe^{-ikx}\right) = ikA\left(e^{ikx} - e^{-ikx}\right)$$

$$\Rightarrow \qquad \frac{h}{2\pi i}\frac{\partial\psi}{\partial x} = \frac{hk}{2\pi}\ A\left(e^{ikx} - e^{-ikx}\right) \neq const.\psi$$

$$\Rightarrow \qquad (not\ \ eigenvalue\ eq.)$$

للخروج من هذا المأزق نحسب القيمة المتوقّعة للعزم حسب المعادلة (2.8)

مع ملاحظة أنّ التكامل في المقام يساوي 1 إذا افترضنا كون الدالة الموجية • عيارية (شرط العيارية):

$$\overline{p}_x = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi^* \hat{p}_x \psi \, dx$$

$$\overline{p}_x = \int_{-\infty}^{+\infty} A\left(e^{ikx} + e^{-ikx}\right)^* \frac{h}{2\pi i} \frac{\partial}{\partial x} A\left(e^{ikx} + e^{-ikx}\right) dx$$

$$\overline{p}_x = \int_{-\infty}^{+\infty} A\left(e^{ikx} + e^{-ikx}\right)^* \frac{hk}{2\pi} \; A\left(e^{ikx} - e^{-ikx}\right) dx$$

$$\overline{p}_x = \int_{-\infty}^{+\infty} A\left(e^{-ikx} + e^{ikx}\right) \frac{hk}{2\pi} \; A\left(e^{ikx} - e^{-ikx}\right) dx$$

$$\overline{p}_x = A^2 \frac{hk}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(e^{-ikx} + e^{ikx}\right)\left(e^{ikx} - e^{-ikx}\right) dx$$

$$\overline{p}_x = A^2 \frac{hk}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(- e^{-2ikx} + e^{2ikx}\right) \, dx = 0$$

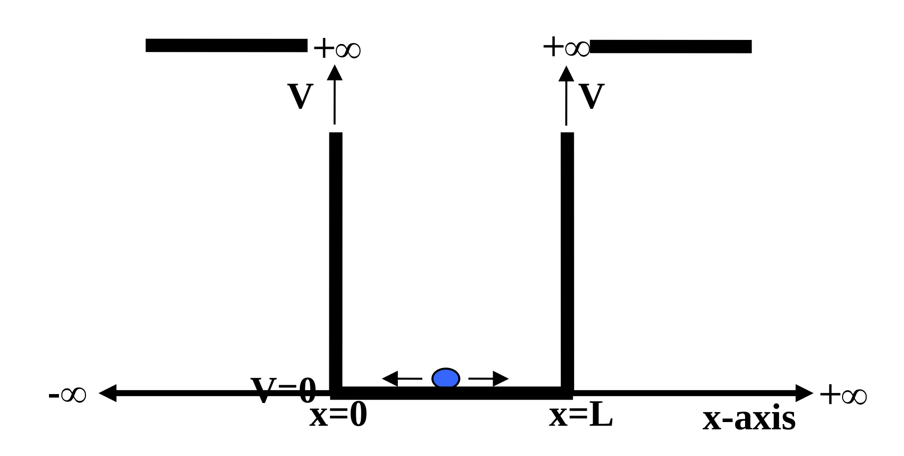
(أثبت أنّ التكامل في المعادلة الأخيرة هو صفر).

تدلّ المعادلة الأخيرة على أنّ متوسط قياساتنا للعزم ستكون صفراً. لماذا؟ نتذكّر هنا أنّ التركيبة الخطية هي تركيبة من حلّين، أوّلهما يعطينا جسيماً يتحرّك باتّجاه اليمين

وعزمه موجب ($p_x = \frac{hk}{2\pi}$) والحلّ الثاني يعطينا جسيماً يتحرّك نحو الشمال وعزمه سالب ولكن مساوٍ في المقدار للعزم الأوّل ($p_x = -\frac{hk}{2\pi}$). وحيث أنّ الحلّ الكلي هو "مزيج" (superposition) من الحلول المختلفة، فإنّ الحلّ الكلي معناه أنّ هنالك احتمالاً مقداره 50% أن نجد الجسيم متحرّكاً نحو اليمين، واحتمالاً 50مقداره % أن نجده متحرّكاً نحو اليسار.

الجسيم في صندوق (particle-in-a box)

ماذا يحدث عندما نقيّد حركة الإلكترون ولا نسمح له إلاّ بالتحرّك داخلَ مجالٍ محدّد؟ يُسمّى هذا الوضع "الجسيم في صندوق" حيث يتحرّك الجسيم حركةً حرّةً في داخل "الصندوق" ولا يُسمح له بمغادرته، ويعبّر عن هذا الصندوق بالرسم التالي:



يتحرّك الجسيم حركة حرّةً ما بين $x=0$ و $x=L$، حيث تكون طاقته الوضعيّة صفراً ($V=0$). لكنّه لا يستطيع أن يتواجد في النقطتين $x=0$ و $x=L$ أو أن يتجاوزهما، وذلك لوجود أسوار عظيمة من الطاقة في هاتين النقطتين لا يستطيع الجسيم أن "يتسلّقها".

إنّ $V=\infty$ تعني أنّه لا بدّ من تزويد الجسيم بمالانهاية من الطاقة لينتقل إلى $x \geq L$ و $x \leq 0$.

إنّ معادلة شرودنجر الخاصة بهذا الجسيم لا تختلف عنها في مثال الجسيم الحرّ، فالطاقة الوضعية للجسيم في صندوق هي أيضاً صفر كما أنّ الجسيم يتحرّك في بعدٍ واحد. وبناءً على هذا فإنّ الحلّ العام لمعادلة شرودنجر للجسيم في صندوق هي نفسها المعادلة التي عرضناها في حال الجسيم الحرّ:

$$\psi = A \cdot e^{ikx} + B \cdot e^{-ikx}$$

إلاّ أنّ هناك شروطاً حدوديّة (boundary conditions) لا بدّ من تحقّقها في حالة الجسيم في صندوق وهي:

أ. يحظر على الجسيم التواجد في النقطة $x=0$، ممّا يعني أنّ احتمال وجوده في هذه النقطة هو صفر (••••) أي أنّ قيمة الدالّة الموجيّة عند هذه النقطة هو أيضاً صفر(•••).

$$\psi = A \cdot e^{ik0} + B \cdot e^{-ik0} = 0$$
$$\psi = A + B = 0 \qquad \Rightarrow \qquad A = -B$$
$$\psi = A \cdot \left(e^{ikx} - e^{-ikx}\right)$$
$$\psi = A \cdot \left[\cos(kx) + i\sin(kx) - \cos(-kx) - i\sin(-kx)\right]$$
$$\psi = A \cdot \left[\cos(kx) + i\sin(kx) - \cos(kx) + i\sin(kx)\right]$$
$$\psi = 2i\,A\sin(kx)$$

ب. يحظر على الجسيم التواجد في النقطة x=L، ممّا يعني أنّ احتمال وجوده في هذه النقطة هو صفر (••••) أيضاً، أي أنّ قيمة الدالّة الموجيّة عند هذه النقطة هو أيضاً صفر(•••).

$$\psi = 2i\,A\sin(kL) = 0$$
$$\sin\left(\pi n\right) = 0 \qquad \Rightarrow \quad n = \pm 1, 2, 3...$$
$$kL = \pi n \qquad \Rightarrow \quad k = \frac{\pi n}{L}$$
$$\psi = 2i\,A\sin(\frac{n\pi}{L}x)$$

ونستطيع إسقاط العدد الخيالي i حيث أنّه لا يُحدث فرقاً بالنسبة لمعادلة شرودنجر فتصبح الدالّة الموجيّة الخاصة بالجسيم في صندوق على النحو التالي:

$$\psi = 2\,A\sin(\frac{n\pi}{L}x)$$

نحاول الآن أن نحدّد قيمة الثابت A وذلك بالاستفادة من شرط العياريّة، والذي يقضي بأنّ احتمال تواجد الجسيم داخل الصندوق هو 100%:

$$\int_0^L 4A^2 \sin^2\left(\frac{n\pi}{L}x\right)dx = 4A^2\int_0^L \sin^2\left(\frac{n\pi}{L}x\right)dx = 1$$

$$\sin^2\theta = \frac{1}{2}(1-\cos 2\theta)$$

$$\int_0^L \sin^2\left(\frac{n\pi}{L}x\right)dx = \frac{1}{2}\int_0^L\left[1-\cos\left(\frac{2n\pi}{L}x\right)\right]dx = \frac{1}{2}\left[x-\frac{L}{2n\pi}\sin\left(\frac{2n\pi}{L}x\right)\right]_0^L = \frac{L}{2}$$

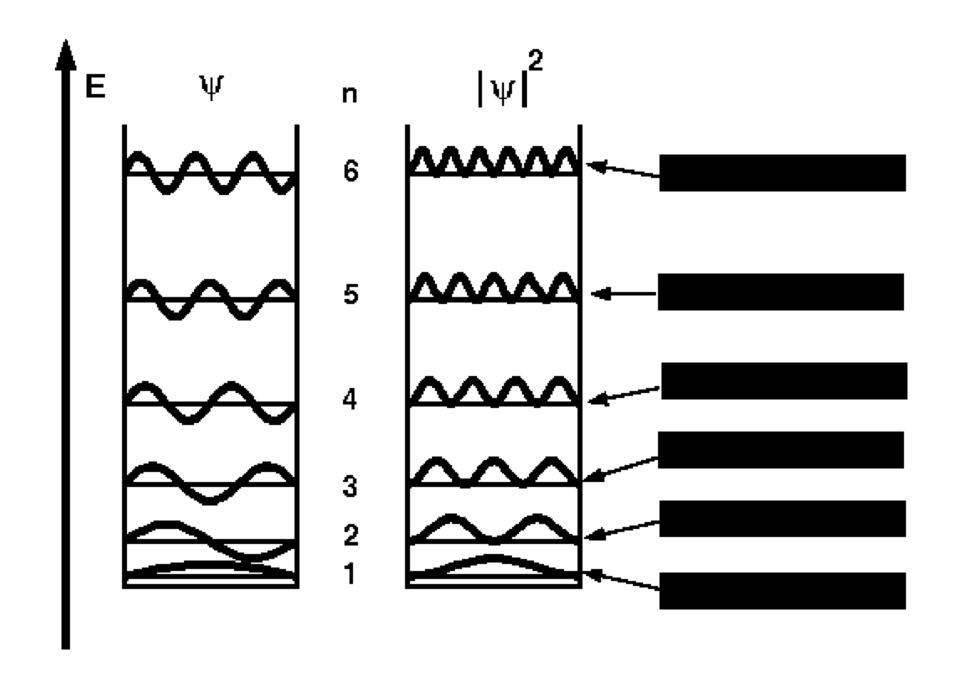
$$4A^2\frac{L}{2} = 1 \qquad \Rightarrow \qquad A = \pm\sqrt{\frac{1}{2L}}$$

لنحسب الآن طاقة الجسيم في صندوق. حيث أنّ معادلة شرودنجر لا تختلف في حال الجسيم في صندوق عنها في حال الجسيم الحرّ، فإنّ الطاقة ستكون في الحالتين متساوية وهي:

$$E = \frac{h^2 k^2}{8\pi^2 m}$$

$$k = \frac{\pi n}{L}$$

$$E = \frac{h^2 \pi^2 n^2}{8\pi^2 m L^2} = \frac{h^2 n^2}{8 m L^2} \qquad (3.3)$$



نلاحظ من المعادلة (3.3)، وأنّه نتيجة للقيود التي فرضناها على حركة الجسيم، أصبحت طاقته الحركيّة مكمّاة (quantized). كما أنّ العزم يصبح أيضاً مكمّىً مع بقاء احتمال أن نجد الجسيم يتحرّك إلى اليمين هو 50% واحتمال أن نجده يتحرّك إلى اليسار هو كذلك 50%:

$$p_x = \pm \frac{hn}{2L} \qquad ....(3.4)$$

نستطيع الآن أن نعمّم النتائج التي حصلنا عليها لتشمل صناديق ثنائيّة وثلاثيّة الأبعاد، حيث يُسمح للجسيم بالتحرّك في بعدين (x,y) أو ثلاثة أبعاد (x,y,z):

Two Dimensions

$$\hat{H} = -\frac{h^2}{8\pi^2 m}\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)$$

$$\psi(x,y) = \psi(x)\cdot\psi(y)$$

$$\psi = 2A_x \sin\left(\frac{n_x \pi}{L_x}x\right)\cdot 2A_y \sin\left(\frac{n_y \pi}{L_y}y\right)$$

$$E_{n_x,n_y} = \frac{h^2}{8m}\left(\frac{n_x^2}{L_x^2} + \frac{n_y^2}{L_y^2}\right)$$

$$E_{n_x,n_y} = \frac{h^2}{8mL^2}\left(n_x^2 + n_y^2\right)$$

Three Dimensions

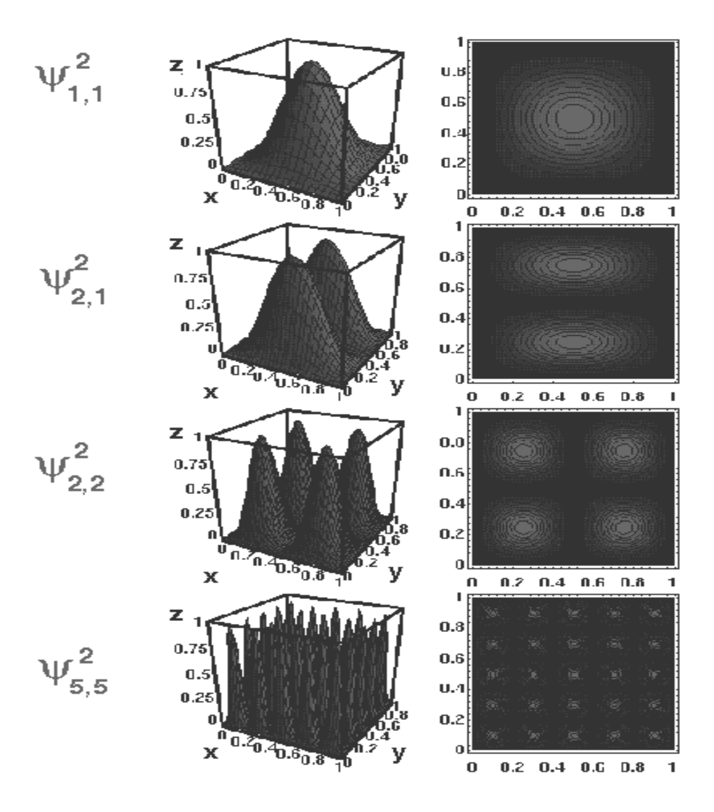
$$\hat{H} = -\frac{h^2}{8\pi^2 m}\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)$$

$$\psi(x,y,z) = \psi(x)\cdot\psi(y).\psi(z)$$

$$\psi = 2A_x \sin\left(\frac{n_x \pi}{L_x}x\right)\cdot 2A_y \sin\left(\frac{n_y \pi}{L_y}y\right)\cdot 2A_z \sin\left(\frac{n_z \pi}{L_z}z\right)$$

$$E_{n_x,n_y,n_z} = \frac{h^2}{8m}\left(\frac{n_x^2}{L_x^2} + \frac{n_y^2}{L_y^2} + \frac{n_z^2}{L_z^2}\right)$$

$$E_{n_x,n_y,n_z} = \frac{h^2}{8mL^2}\left(n_x^2 + n_y^2 + n_z^2\right)$$



ويمثّل الرسم أعلاه كثافة احتمال تواجد الجسيم في صندوق ثنائي الأبعاد في مستويات طاقة مختلفة. أمّا كثافة احتمال تواجد الجسيم في صندوق ثلاثي الأبعاد فيصعب تصويرها لحاجتنا لبعد رابع لإظهارها.

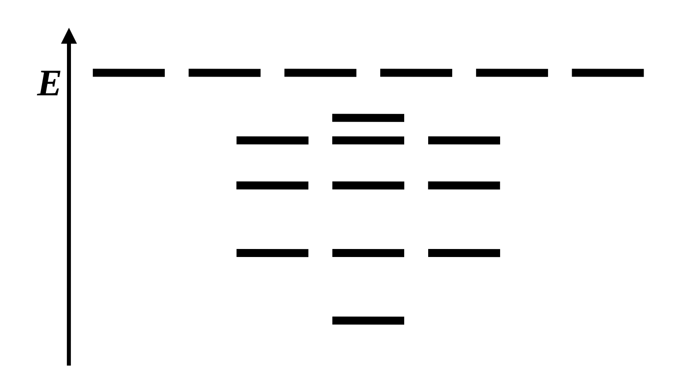
ومن المفيد عند هذه النقطة أن نشرح ظاهرة التفسّخ (degeneracy) في حال الصندوق ثلاثي الأبعاد. ليكن الصندوق مكعّباً، وليكن المقدار $E_0 = \dfrac{h^2}{8mL^2}$.

تكون بذلك طاقة الجسيم على النحو: $E_{n_x,n_y,n_z} = E_0\left(n_x^2 + n_y^2 + n_z^2\right)$. يبيّن الجدول التالي قيم طاقة الجسيم حسب قيم nx,ny,nz المختلفة:

nx	ny	nz	E
1	1	1	3×E0
1	1	2	6×E0
1	2	1	6×E0
2	1	1	6×E0
2	1	2	9×E0
2	2	1	9×E0
1	2	2	9×E0
1	1	3	11×E0
1	3	1	11×E0
3	1	1	11×E0
2	2	2	12×E0
1	2	3	14×E0

1	3	2	14×E0
2	1	3	14×E0
2	3	1	14×E0
3	1	2	14×E0
3	2	1	14×E0

مستوى الطاقة الأوّل غير متفسّخ (انظر الرسم أدناه)، درجة التفسّخ في مستوى الطاقة الثاني ثلاثيّة (حيث أنّ هناك ثلاث دالاّت موجيّة لها نفس قيمة الطاقة) وفي المستوى الثالث ثلاثية وهلمّ جرّاً. احسب درجة التفسّخ لمستويات الطاقة السادس والسابع والثامن!



تدريب (1): اشتقّ من معادلة الطاقة للجسيم في صندوق أحادي الأبعاد (المعادلة 3.3) تعبيراً عامّاً للفرق بين أيّ مستَوَوَيْ طاقة متجاورين!

$$E = \frac{h^2 n^2}{8mL^2} = E_0 \cdot n^2 \qquad E_0 = \frac{h^2}{8mL^2}$$

$$\Delta E_n^{n+1} = E_{n+1} - E_n = E_0(n+1)^2 - E_0 n^2 = E_0(n^2 + 2n + 1) - E_0 n^2$$

$$\Delta E_n^{n+1} = (2n+1) \cdot E_0 = (2n+1) \cdot \frac{h^2}{8mL^2}$$

تدريب (2): إلكترون في صندوق أحادي الأبعاد يحتاج إلى أشعة طولها الموجي 500 nm للانتقال من مستوى الطاقة الثالث إلى مستوى الطاقة السادس. احسب عرض الصندوق!

$$\Delta E_3^6 = E_6 - E_3 = photon\ energy = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.6 \times 10^{-34}\ J\ s)(3.0 \times 10^8\ m/s)}{500\,nm}$$

$$= \frac{(6.6 \times 10^{-34}\ J\ s)(3.0 \times 10^8\ m/s)}{500 \times 10^{-9}\,m} = 3.96 \times 10^{-19}\,J$$

$$\Delta E_3^6 = E_6 - E_3 = E_0(6^2) - E_0(3^2) = 27E_0$$

$$E_0 = \frac{\Delta E_3^6}{27} = \frac{3.96 \times 10^{-19}\,J}{27} = 1.47 \times 10^{-20}\,J$$

$$E_0 = \frac{h^2}{8mL^2} \qquad L = \sqrt{\frac{h^2}{8mE_0}} = \frac{h}{\sqrt{8mE_0}}$$

$$L = \frac{6.6 \times 10^{-34}\ J\ s}{\sqrt{8 \times (9.11 \times 10^{-31} kg) \times 1.47 \times 10^{-20}\,J}} = 2 \times 10^{-9}\,m = 2\,nm$$

تدريب (3): كرة كتلتها 1.0×10-6g تتحرّك بسرعة مقدارها 10-1cm/s في صندوق عرضه 1 cm. احسب رقم مستوى الطاقة الموجودة فيه الكرة (n)! احسب الفرق بين طاقة هذا المستوى والمستوى الذي يعلوه مباشرة!

$$E_{ball} = K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\times\left(1.0\times10^{-9}\,kg\right)\left(10^{-3}\,m/s\right)^2 = 5\times10^{-16}\,J$$

$$E_{ball} = E_0\,n^2 \qquad\qquad n = \sqrt{\frac{E_{ball}}{E_0}}$$

$$E_0 = \frac{h^2}{8mL^2} = \frac{\left(6.6\times10^{-34}\,J\,s\right)^2}{8\times\left(1.0\times10^{-9}\,kg\right)\left(10^{-2}\,m\right)^2} = 5.44\times10^{-55}\,J$$

$$n = \sqrt{\frac{5\times10^{-16}\,J}{5.44\times10^{-55}\,J}} = 3.03\times10^{19}$$

$$\Delta E_n^{n+1} = (2n+1)\cdot E_0 = 6.06\times10^{19}\times\left(5.44\times10^{-55}\,J\right) = 3.3\times10^{-35}\,J$$

لا شكّ أنّ فروق الطاقة بين المستوى الموجود فيه الكرة والمستوى الموجود فوقه مباشرةً ضئيل جدّاً جدّاً ولا يمكن قياسه أبداً من الناحية العملية، ولذلك فإنّ الطاقة تعتبر من الناحية العمليّة متصلة لا منفصلة وبذلك تطيع الأجسام في مثل هذه المستويات قوانين الفيزياء التقليدية. يُعبّر عن هذه الحقيقة بمبدأ التطابق (correspondence principle) والذي ينص على أنّ الفيزياء التقليدية وفيزياء الكمّ يلتقيان عندما يكون العدد الكمي لمستويات الطاقة (n) كبيراً جدّاً كما هو الحال في المثال السابق.

تدريب (4): احسب احتمال تواجد الجسيم في صندوق أحادي الأبعاد بين النقطتين x=0.49 L و x=0.51 L عندما يكون الجسيم أ) في مستوى الطاقة الأوّل و ب) في مستوى الطاقة الثاني. افرض أنّ الدالّة الموجية ثابتة في المدى المذكور.

احتمال تواجد الجسيم بين أيّ نقطتين هو: $P_{x_1-x_2} = \int_{x_1}^{x_2} \psi^2 dx$.

$$For \quad n=1$$

$$\psi = \frac{2}{\sqrt{2L}} \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) = \frac{2}{\sqrt{2L}} \sin\left(\frac{\pi}{L}x\right)$$

$$\psi_{x_1} = \frac{2}{\sqrt{2L}} \sin\left(\frac{\pi}{L}0.49L\right) = \frac{2}{\sqrt{2L}} \sin(0.49\pi) = \frac{1.413729}{\sqrt{L}}$$

$$\psi_{x_2} = \frac{2}{\sqrt{2L}} \sin\left(\frac{\pi}{L}0.51L\right) = \frac{2}{\sqrt{2L}} \sin(0.51\pi) = \frac{1.413729}{\sqrt{L}}$$

$$\overline{\psi} = \frac{1.413729}{\sqrt{L}}$$

$$P = \int_{0.49}^{0.51} \overline{\psi}^2 dx = \overline{\psi}^2 \int_{0.49}^{0.51} dx = \left(\frac{1.413729}{\sqrt{L}}\right)^2 (0.51L - 0.49L) = \frac{0.04L}{L} = 4\%$$

أتمم حساب المطلوب في الفرع ب).

تدريب (5): جسيم موجود في صندوق أحادي الأبعاد في مستوى الطاقة الثالث. احسب المواقع التي يكون احتمال تواجد الجسيم فيها أعلى ما يمكن.احتمال تواجد الجسيم في نقطة ما يكون أعلى ما يكون عندما تكون كثافة الاحتمالية أعلى ما تكون (قيمة عظمى). لمعرفة القيمة العظمى نسوّي المشتقّة الأولى لكثافة الاحتمالية بصفر.

$$\frac{d\left(\psi^{2}\right)}{d\,x} = 2\psi\frac{d\,\psi}{d\,x} = 0$$

$$\psi = 2\,A\sin\left(\frac{3\pi}{L}x\right) \qquad \frac{d\,\psi}{d\,x} = 2\,A\cos\left(\frac{3\pi}{L}x\right)\cdot\left(\frac{3\pi}{L}\right)$$

$$2\psi\frac{d\,\psi}{d\,x} = 4\,A\sin\left(\frac{3\pi}{L}x\right)\cdot 2\,A\cos\left(\frac{3\pi}{L}x\right)\cdot\left(\frac{3\pi}{L}\right) = 0$$

$$\sin\left(\frac{3\pi}{L}x\right)\cdot\cos\left(\frac{3\pi}{L}x\right) = 0$$

$$\sin\left(\frac{3\pi}{L}x\right) = 0 \quad\Rightarrow\quad \frac{3\pi}{L}x = n\,\pi \quad\Rightarrow\quad x = \frac{n\,L}{3}$$

$$\Rightarrow\quad x = 0,\ \frac{1}{3}L,\ \frac{2}{3}L,\ \frac{3}{3}L$$

$$\cos\left(\frac{3\pi}{L}x\right) = 0 \quad\Rightarrow\quad \frac{3\pi}{L}x = \frac{(2n-1)\pi}{2} \quad\Rightarrow\quad x = \frac{(2n-1)\,L}{6}$$

$$\Rightarrow\quad x = \frac{1}{6}L,\ \frac{3}{6}L,\ \frac{5}{6}L$$

كما يجب أن تكون المشتقة الثانية لكثافة الاحتمالية سالبةً:

$$\frac{d^2(\psi^2)}{dx^2}=\frac{d\left(\frac{d\psi^2}{dx}\right)}{dx}=\frac{d\left(2\psi\frac{d\psi}{dx}\right)}{dx}=2\psi\frac{d^2\psi}{dx^2}+2\left(\frac{d\psi}{dx}\right)^2<0$$

$$\frac{d^2\psi}{dx^2}=-2A\frac{9\pi^2}{L^2}\sin\left(\frac{3\pi}{L}x\right) \qquad 2\psi\frac{d^2\psi}{dx^2}=-8A^2\frac{9\pi^2}{L^2}\sin^2\left(\frac{3\pi}{L}x\right)$$

$$2\left(\frac{d\psi}{dx}\right)^2=8A^2\frac{9\pi^2}{L^2}\cos^2\left(\frac{3\pi}{L}x\right)$$

$$2\psi\frac{d^2\psi}{dx^2}+2\left(\frac{d\psi}{dx}\right)^2=8A^2\frac{9\pi^2}{L^2}\left[\cos^2\left(\frac{3\pi}{L}x\right)-\sin^2\left(\frac{3\pi}{L}x\right)\right]<0$$

$$\left[\cos^2\left(\frac{3\pi}{L}x\right)-\sin^2\left(\frac{3\pi}{L}x\right)\right]<0$$

$$\Rightarrow \qquad \cos^2\left(\frac{3\pi}{L}x\right)<\sin^2\left(\frac{3\pi}{L}x\right)$$

الشرط الأخير لا يتحقّق بالإمكانات الأربع الأولى (0, L/3, 2L/3, L) ويتحقّق بالإمكانات الثلاث الأخيرة (L/6, L/2, 5L/6) والتي تمثّل المواقع التي يكون تواجد الجسيم فيها اكبر ما يمكن (قارن الإجابة بالرسم في الصفحة 52).

الطريقة السابقة هي الطريقة العامّة لحلّ مثل هذه المسائل، ولكن يمكن أيضاً حلّ السؤال بطريقة أيسر وذلك بإيجاد مواقع العقد (0••) وتكون مواقع القيم العظمى بالضبط بين كلّ عقدتين متتاليتين. ارجع للرسم ص52 للتأكّد من ذلك.

تدريب (6): جسيم موجود في صندوق أحادي الأبعاد في مستوى الطاقة الخامس. احسب المواقع التي يكون احتمال تواجد الجسيم فيها أعلى ما يمكن وذلك عن طريق معرفة مكان العقد. أعد الحلّ لجسيم في مستوى الطاقة الثامن.

الجزيئات ذات أنظمة • المقترنة (conjugated ••electron systems)

يمكن الاستفادة من نموذج "الجسيم في صندوق" أحادي الأبعاد لتقدير طاقة إلكترونات • في الجزيئات التي تكون فيها تلك الإلكترونات مقترنة (conjugated •-electrons)، مثل 1,3-butadiene (CH2=CH-CH=CH2)، حيث تعتبر إلكترونات • حرّة الحركة داخل صندوق طوله طول الجزيء. وحسب هذا التقريب (approximation) فإنّنا نهمل تماماً وجود الكترونات جميع روابط • في الجزيء، كما نهمل التأثير المتبادل (mutual interaction) بين إلكترونات • وإلكترونات •.

لتقدير طول الجزيء نحتاج إلى معرفة طول الروابط بين ذرّات الكربون. نتذكّر هنا أنّه في مثل هذه الأنظمة المقترنة تكون الروابط متساوية بسبب حرية الكترونات • في الحركة وعدم تمركزها بين ذرّتين محدّدتين، وتكون رتبة جميع الروابط واحدة حيث تأخذ قيمة وسطية بين 1 و 2، ويقدّر طول الرابطة الواحدة بحوالي 1.4 Å. وعلى هذا، تكون المسافة بين أطراف الجزيء (ذرّتي الكربون الطرفيّتين) بمقدار ثلاث روابط،

ولكن وُجد أنّ النتائج تكون أفضل إذا سمحنا للإلكترونات بتجاوز ذرّتي الكربون الطرفيّتين بمقدار نصف رابطة من كلّ جهة فيصبح بذلك طول الصندوق الذي يسمح للإلكترونات بالتحرّك فيه بمقدار أربع روابط. وعموماً يكون عدد الروابط المستخدمة في تقدير أبعاد هذا الصندوق بعدد ذرّات الكربون المكوّنة لنظام • المقترن.

نطبّق الآن هذه المفاهيم عل جزيء 1,3-butadiene باستخدام المعادلة (3.3) ونحسب طاقة الأفلاك الجزيئية الأربعة (عدد الأفلاك الجزيئية يكون بعدد الأفلاكالذرّية atom orbitals، وحيث أنّ كلّ ذرة كربون في جزيء 1,3-butadiene تعطي الكتروناً واحداً في الفلك الذري p فإن هناك أربعة أفلاك جزيئية molecular orbitals):

$$E_n = E_0 \cdot n^2 \qquad E_0 = \frac{h^2}{8mL^2} = \frac{\left(6.6\times10^{-34}\,J\,s\right)^2}{8\times\left(9.11\times10^{-31}kg\right)\left(5.6\times10^{-10}m\right)^2}$$

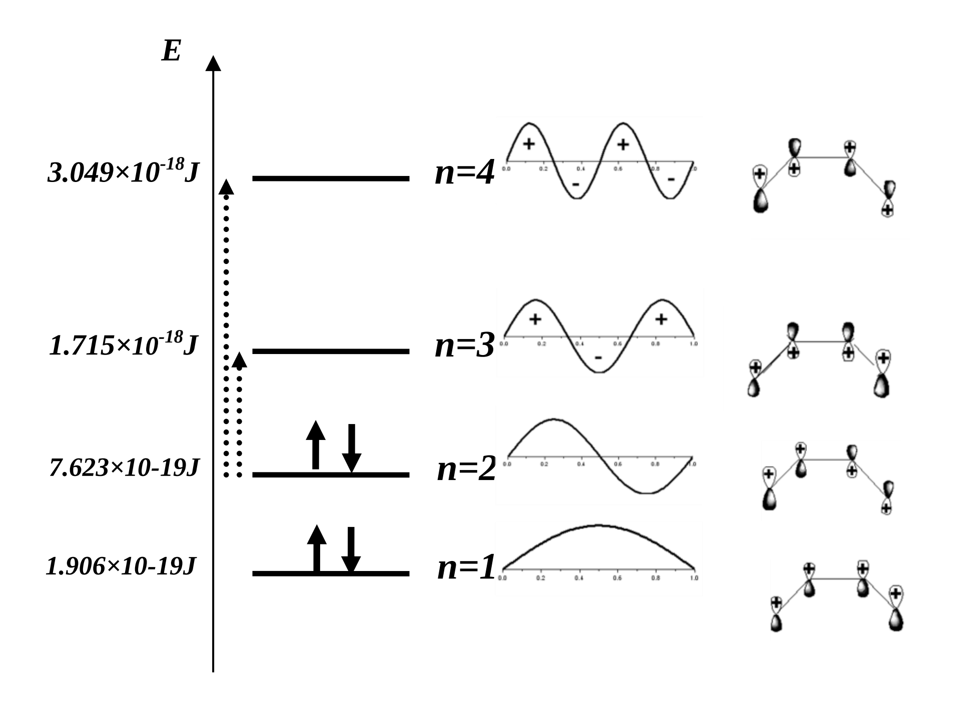
$$m = m_{electron} = 9.11\times10^{-31}kg$$

$$L = 4\times Bond\ Length = 4\times1.4\,angstrom = 5.6\,angstrom = 5.6\times10^{-10}m$$

$$E_0 = 1.906\times10^{-19}\,J$$

$$E_1 = \left(1.906\times10^{-19}\,J\right)\times1^2 \qquad E_2 = \left(1.906\times10^{-19}\,J\right)\times2^2$$

$$E_3 = \left(1.906\times10^{-19}\,J\right)\times3^2 \qquad E_4 = \left(1.906\times10^{-19}\,J\right)\times4^2$$



يوضّح الرسم أعلاه مستويات الطاقة الأربع موزّعةً عليها إلكترونات • حسب مبدأ باولي (Pauli) والذي ينتج منه أنّ كلّ فلك يتّسع فقط لإلكترونين متعاكسين من حيث حركتهما المغزلية (spin). كما نلاحظ إلى يمين الرسم التوافق الكبير بين نظرية الأفلاك الجزيئية (molecular orbital theory) و"تقريب الجسيم في صندوق"

من حيث العقد وإشارة الدالّة الموجية (لاحظ أيضاً أنّه كلّما زاد عدد العقد، زادت طاقة المستوى، وهذه علاقة عامّة جديرة بالانتباه لها).

يسمّى أعلى مستوى طاقة مملوءٍ بإلكتروناتٍ HOMO (highest occupied molecular orbital)، كما يسمّى أخفضُ مستوى طاقةٍ فارغٍ من الإلكترونات LUMO (lowestunoccupied molecular orbital)، ويكون الانتقال الإلكتروني الأوّل هو الانتقال من الـ HOMO إلى الـ LUMO.

لنحسب الآن طاقة إلكترونات π، وهي مجموع طاقة الإلكترونين الموجودين في المستوى الأوّل والإلكترونين الموجودين في المستوى الثاني:

$$E_\pi = 2 \cdot E_1 + 2 \cdot E_2 = 2(E_1 + E_2) = 2(1.906 \times 10^{-19} + 7.623 \times 10^{-19}) = 1.906 \times 10^{-18} J$$

تدريب (7): احسب الطول الموجي للأشعة اللاّزمة لإثارة جزيء 1,3-butadiene من حالة الاستقرار إلى المستوى المُثار الأوّل (الانتقال الأوّل).

$$\Delta E_2^3 = E_3 - E_2 = 1.715 \times 10^{-18} J - 7.623 \times 10^{-19} J = 9.527 \times 10^{-19} J$$

$$\Delta E_2^3 = \frac{hc}{\lambda} \qquad \Rightarrow \qquad \lambda = \frac{hc}{\Delta E_2^3}$$

$$\lambda = \frac{(6.6 \times 10^{-34} Js) \times (3.0 \times 10^8 m/s)}{9.527 \times 10^{-19} J} = 2.078 \times 10^{-7} m = 207.8\, nm$$

تتّفق القيمة المحسوبة في المثال أعلاه مع القيمة التجريبية حيث يُلاحظُ خطّ امتصاصٍ لجزيء 1,3-butadiene عند 220 nm يمكننا أن نعزوَه إلى الانتقال من الـ HOMO إلى الـ LUMO.

تدريب (8): احسب الطول الموجي للأشعة اللازمة لإثارة جزيء 1,3-butadiene من حالة الاستقرار إلى المستوى المُثار الثاني.

تدريب (9): احسب الطول الموجي للأشعة اللازمة لإثارة الانتقال في جزيء lycopene من الـ HOMO إلى الـ LUMO.

إلكترونات • المقترنة عددها 22 إلكتروناً ممتدّة في صندوق عرضه بمقدار 22 رابطة (السلسلة الوسطى في الجزيء).

$$L = 1.4\,angstrom \times 22 = 30.8\,angstrom = 30.8\times10^{-10} m$$

$$E_0 = \frac{h^2}{8mL^2} = \frac{\left(6.6\times10^{-34} J\,s\right)^2}{8\times\left(9.11\times10^{-31}kg\right)\times\left(3.08\times10^{-9} m\right)^2} = 6.3\times10^{-21} J$$

تتوزّع الإلكترونات الـ 22 على أحد عشر مستوى طاقة حيث أنّ كلّ مستوى يتّسع لإلكترونين، ويكون بذلك مستوى الـ HOMO هو المستوى 11 ومستوى الـ LUMO هو المستوى 12.

$$\Delta E_{11}^{12} = E_{12} - E_{11} = E_0(12)^2 - E_0(11)^2 = E_0(144-121) = 23E_0$$

$$\Delta E_{11}^{12} = 23\times\left(6.3\times10^{-21} J\right) = 1.45\times10^{-19} J$$

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E_{11}^{12}} = \frac{\left(6.6\times10^{-34} Js\right)\times\left(3.0\times10^{8} m/s\right)}{1.45\times10^{-19} J} = 1.366\times10^{-6} m = 1366\,nm$$

إذا علمت أنّ مادة lycopene[1] هي المسؤولة عن اللون الأحمر في الطماطم والبطيخ والكريفون الزهري أدركت أنّ الجواب الذي حصلنا عليه غير مقبول، فكون المادة حمراء اللون دليل على أنّها تمتص جزءاً من الأشعة المرئية،

1 . مادّة اللايكوبين هي من عائلة الكاروتينيدات (نسبةً إلى الكاروتين الموجود في الجزر والورقيّات الخضراء والذي يستخدم أيضاً كملوّن في الصناعات الغذائية) والتي وُجد أنّها تعمل في جسم الإنسان كمضادّ للتأكسد ومضادّ للسرطان ممّا يعطيها أهمّية صحيّة كبيرة.

وبعبارة أدق فإنّها تمتص اللون المكمّل للّون الأحمر أي الأخضر المزرقّ، وعليه فإنّ طول الموجة الممتصّة سيكون حوالي 500 nm. أمّا الرقم الذي حصلنا عليه فهو من ضمن الأشعة تحت الحمراء الغير مرئية.

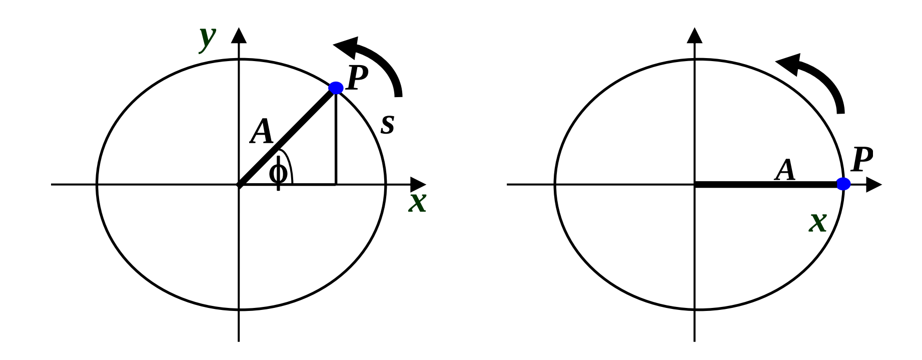
ما هو السبب يا ترى في هذا الخطأ الكبير الناتج عند استخدام تقريب "الجسيم في صندوق"؟ السبب الرئيس في ذلك أنّ تقريب "الجسيم في صندوق" يفرض أنّ الطاقة الوضعيّة لإلكترونات • هي صفر فيتجاهل بذلك التنافر بين إلكترونات • نفسها كما يتجاهل التنافر بين إلكترونات • وإلكترونات روابط •. إنّ التنافر بين الإلكترونات سيؤدّي إلى رفع مستويات الطاقة وابتعادها عن بعضها ممّا يؤدّي إلى قصر الأطوال الموجية اللازمة للإثارة. بالإضافة إلى ذلك، هناك عدم دقّة في تحديد طول الصندوق الذي تتحرّك فيه الإلكترونات.

الفصل الرابع عشر

المهتزّ التوافقيَ والرابطة الكيميائيّة

المهتزّ التوافقي (Harmonic Oscillator)

لنتأمّل في النقطةP في الرسم التالي والتي تقوم بحركة دائريّة عكس عقارب الساعة حول نقطة الأصل في المستوى•x-y •بنصف قطر مقداره •، ولتكن النقطة في بداية الأمر على المحور السيني (x-axis).



بتحرّك النقطة P عكس عقارب الساعة نحصل على زاوية بين الخط الواصل بين النقطة P ونقطة الأصل وبين محور السينات، وتُعَرّف هذه الزاوية • بوحدة الراديان (radian) بأنّها مقدار طول القوس المقطوع s مقسوماً على نصف قطر الدوران A. مع الزمن تكبر الزاوية • وعندما تكمل النقطة P دورة كاملة تكون قد قطعت زاوية مقدارها •• بوحدة الراديان أي ما يعادل 360°

لتبدأ بعدها دورةً جديدة، ويُطلق على عدد الدورات التي تقطعها النقطة P في وحدة الزمن (الثانية الواحدة مثلاً) مصطلح التردّد (frequency) ويُعطى الرمز •. نُعَرِّف الآن السرعة الزاويّة • بأنّها – على غرار تعريف السرعة العادية- مقدار التغيّر في الزاوية • في وحدة الزمن:

$$\omega = \frac{\phi}{t} = const. \qquad \omega = \frac{d\phi}{dt}$$

$$v = \frac{x}{t} = const. \qquad v = \frac{dx}{dt}$$

وإذا كانت النقطة P تقطع العدد • من الدورات في وحدة الزمن فإنّها تقطع بحركتها تلك زاوية مقدارها ••• لأنّ كل دورة تشمل زاوية مقدارها •• (360°)، وعليه فإنّ السرعة الزاويّة للنقطةP ستكون:

$$\omega = \frac{\phi}{t} = \frac{\phi}{1} = 2\pi v$$

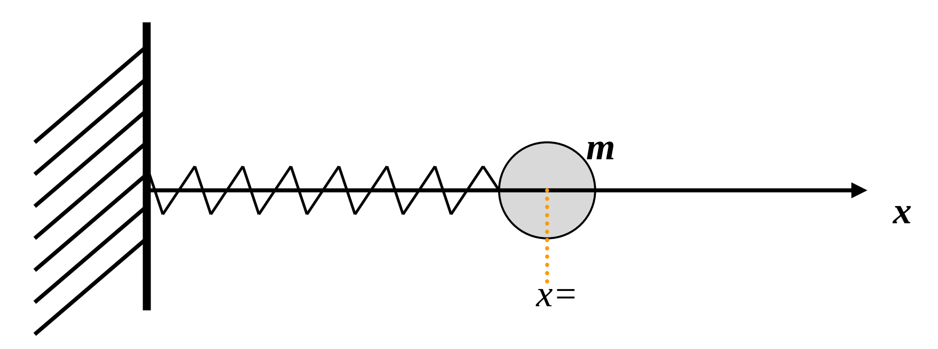
نسأل أنفسنا الآن عن إحداثيّات النقطة P السينيّة (x-coordinate) والتي يمثّلها طول إسقاط الخط الواصل بين النقطة P ونقطة الأصل على محور السينات x. بالرجوع إلى يسار الرسم أعلاه نستنبط طول الإسقاط ونقوم من ثمّ بإيجاد المشتقّة الأولى والمشتقّة الثانية بالنسبة للزمن t:

$$x = A \cdot \cos\phi = A \cdot \cos(\omega t)$$
$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = -\omega A \cdot \sin(\omega t)$$
$$\ddot{x} = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 A \cdot \cos(\omega t) = -\omega^2 x$$
$$\Rightarrow \qquad \ddot{x} + \omega^2 x = 0 \qquad (4.1)$$

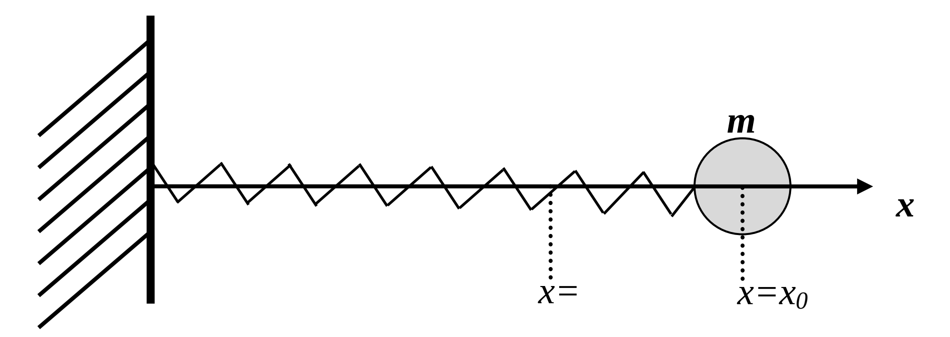
يُوصف التغيّر في قيمة x مع الزمن بأنّه حركة اهتزازيّة توافقيّة، لأنّ قيمة x تظلّ تعيد نفسها (اهتزاز) على نفس النسق دون أيّ تغيير (توافقي) وبدون مؤثّر خارجي. وعموماً، فإنّ أيّة حركة تطيع المعادلة (4.1) هي حركة اهتزازيّة توافقيّة.

معالجة كلاسيكيّة لاهتزازات النابض (الزنبرك) التوافقية:

يمثّل الرسم أدناه نابضاً مثبّتاً من أحد طرفيه بحائط وبطرفه الثاني بكرة كتلتها m، ويُسمح للنابض بالتحرّك في بعدٍ واحدٍ فقط وليكنْ البعدَ السيني•x:



عندما تتواجد الكتلة m في نقطة الأصل (x=0) فإنّ النابض يكون في طوله الطبيعي، لا هو مضغوط ولا هو مشدود وهو ما يُسمّى بحالة التوازن؛ عندها لا تؤثّر أيّة قوّة على الكرة وتكون بذلك طاقتها الوضعيّة صفراً. ماذا يحدث يا تُرى لو قمنا بشدّ الكرة مع النابض من وضعها الأصلي (x=0) إلى النقطة (x=x0)؟



تؤدّي استطالة النابض إلى نشوء قوّة تؤثّر على الكرة وتقوم هذه القوة بشدّ الكرة تُجاه الحائط، ويمكننا تحديد مقدار هذه القوّة بالاستفادة من قانون هوك (Hooke) والذي يقضي بأنّ قوّة شدّ (أو دفع) النابض- والمسؤولة عن إرجاع النابض إلى حالة التوازن- تتناسب طردياً مع مقدار الاستطالة (الزيادة المحدثة في طول النابض)•

$$F_{restoring} = k \cdot x$$

حيث تمثّل x مقدار استطالة النابض عن وضعه الأصلي (elongation)، أمّا k فهو ثابت التناسب ويسمّى ثابت قوّة النابض (force constant)، وكلّما كانت قيمة هذا الثابت أكبر كانت القوّة اللازمة لتغيير طول النابض أكبر، والعكس صحيح. كما تَجدر الإشارة إلى أنّ الاستطالة x تأخذ أيضاً قيماً سالبة ممّا يعني أنّ النابض أصبح أقصر نتيجة انضغاطه.

بوجود الكرة تحت تأثير قوّة النابض، أصبحت الكرة تمتلك طاقة وضع، وتنبئنا الفيزياء التقليدية أنّ طاقة الوضع هذه تساوي $E_{pot} = \frac{1}{2} k x_0^2$ ، وتساوي هذه الطاقة الوضعية الطاقةَ الكلّيةَ للكرة حيث أنّها لا تتحرّك وسرعتها بالتالي صفر، ممّا يعني أنّ طاقتها الحركية كذلك صفر($E_{kin} = \frac{1}{2} m v^2$).

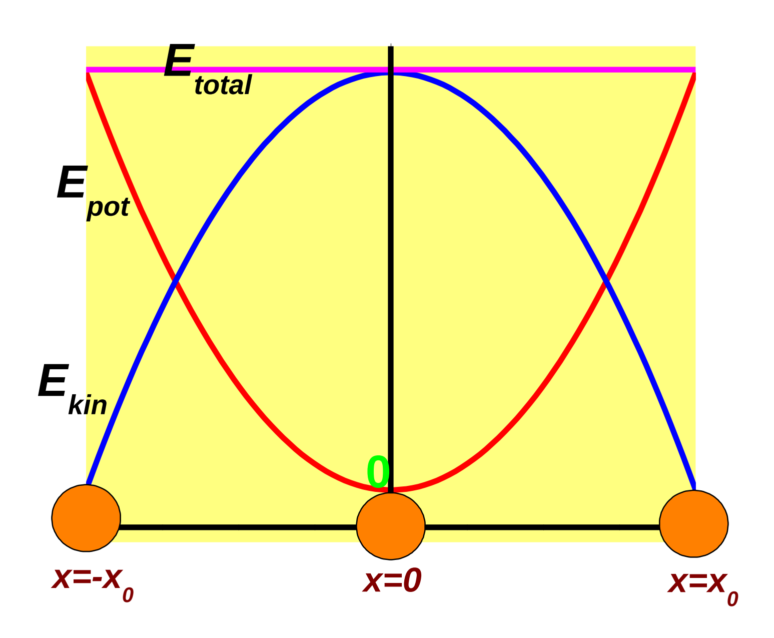
ماذا يحدث الآن إذا أطلقنا الكرة وسمحنا لها بالتحرّك بحرّية؟ ستبدأ الكرة حركتها المتسارعة نتيجة تأثير قوّة شدّ النابض[1]، وحسب قانون حفظ الطاقة فإنّ الطاقة الحركية التي أصبحت الكرة تمتلكها الآن لم تأتِ من العدم، بل نتجت من تحوّل جزء من طاقة الوضع الكامنة أصلاً في الكرة إلى طاقة حركة، وعندما تصل الكرة إلى النقطة (x=0) تكون طاقتها الوضعية

قد أصبحت صفراً ($E_{pot} = \frac{1}{2} k x^2$) وتكون بذلك الطاقة الكلّيّة للكرة على شكل طاقة حركيّة فقط. إنّ امتلاك الكرة لطاقة حركيّة في النقطة (x=0) يعني أنّها لن تقف في هذه النقطة فهي تمتلك سرعة، بل ستستمر الكرة في حركتها متجاوزةً النقطة (x=0) ضاغطةً النابض مُحدثةً استطالةً سالبة، لتعود الطاقة الوضعية إلى الوجود. وبالطبع سيقاوم النابض حركة الكرة مسبّباً تباطؤها، وتزداد مقاومة النابض كلّما زاد انضغاطه، وتتباطأ الكرة أكثر فأكثر حتى تصل إلى النقطة (x=-x0) حيث تصبح سرعتها صفراً وتكون طاقتها كلّها على شكل طاقة وضعيّة. وتعود الكرة مرّة أخرى إلى الحركة في الاتّجاه المعاكس نتيجة ضغط النابض، وتظلّ طاقتها الحركية بازدياد على حساب طاقتها الوضعية حتى تصل مرّة أخرى إلى النقطة (x=0)، وتتجاوزها،

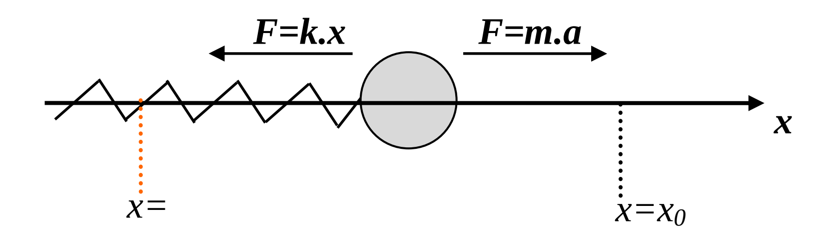
---

1 حسب قانون نيوتن الثاني تسبّب القوة تسارعاً (تزايداً في السرعة)، F=m.a.

حيث تقل طاقة الحركة وتزداد طاقة الوضع نتيجة استطالة النابض تدريجياً، وتعود الكرّة من جديد إلى النقطة (x=x0) وقد تحوّلت كلّ طاقتها الحركيّة إلى طاقة وضعيّة مُنْهِيةً بذلك دورةً واحدةً من الاهتزاز ولتبدأ بعدها دورةً جديدة تُعيد فيها كلّ ما سبق، وتظلّ الكرة تقطع دورةً تلو الأخرى إلى المالانهاية طالما أنّه لا توجد قوى احتكاك تَفْقِد الكرة طاقتَها عن طريقها. ويلخّص الرسم التالي عمليات تحوّلات الطاقة خلال الحركة الاهتزازية الموصوفة أعلاه.



لنتأمّل الآن في الكرة قبيل نهاية دورتها وقد جاوزت النقطة (x=0) وتتحرّك باتّجاه النقطة (x=x0). ماهي القوى المؤثّرة عليها؟ نستطيع أن نميّز قوّتين: الأولى متمثّلة في طاقتها الحركية والتي تدفعها نحو النقطة (x=x0)، والثانية متمثّلة في قوّة شدّ النابض والتي تسحبها في الاتّجاه المعاكس نحو النقطة (x=0).



نستطيع الآن أن نضع الإطار الرياضي لحركة النابض:

$$m\,a = -k\,x$$

$$m\,\ddot{x} + k\,x = 0$$

$$\ddot{x} + \frac{k}{m}x = 0 \qquad (4.2)$$

وبمقارنة المعادلة الأخيرة بالمعادلة (4.1) نجد أنّ حركة النابض هي حركة اهتزازيّة توافقيّة وأنّ الدورة التي يقوم بها النابض لا تختلف البتّة عن الدورة التي قامت بها النقطة P في حركتها الدائريّة حول نقطة الأصل. ويمكننا الآن تحديد السرعة الزاويّة للنابض وكذلك تردّده من مقارنة المعادلتين (4.1) و(4.2):

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \qquad \Rightarrow \qquad \nu = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \qquad (4.3)$$

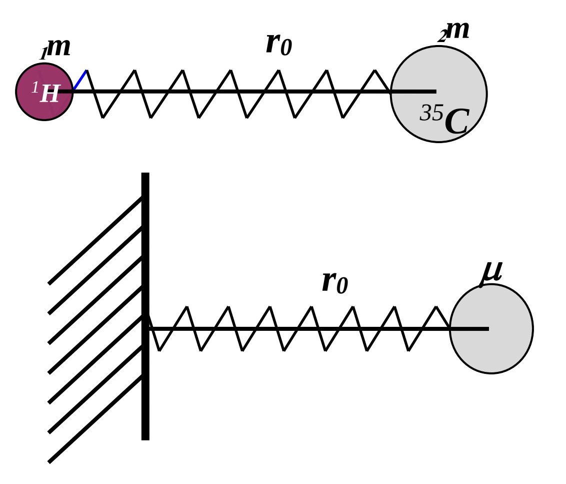
وتبيّن المعادلة الأخيرة أنّ تردّد النابض صفةٌ أصيلة فيه لا تعتمد إلاّ على عاملين اثنين لا غير، هما ثابت قوّة النابض ومقدار الكتلة المتّصلة به، بغضّ النظر عن قيمة الاستطالة الابتدائيّة x0، إذ لا تأثير لها على تردّد النابض وإن كانت تحدّد الطاقة الكلية للنابض وبالتالي السرعة التي تتحرّك بها الكرة. يسمّى هذا التردّد الخاص بالنابض بالتردّد الأساسي (fundamental frequency) ويرمز له بالرمز ••.

تدريب (1): اشتقّ من المعادلة (4.3) وحدة ثابت القوّة k حسب النظام الدولي للوحدات (SI units).

تدريب (•): احسب تردّد نابض ثابت قوّته هو 2000 N/m ومربوط بكتلة مقدارها 2 g.

المهتزّ التوافقيّ والرابطة الكيميائيّة :

تنبع أهمّيّة نموذج المهتزّ التوافقي للكيميائيّين من حقيقة أنّه يمكن استخدام هذا النموذج لوصف الحركة الاهتزازيّة للذرّات المكوّنة للجزيئات، حيث تُعتبر الروابط الكيميائيّة نوابض تربط بين الذرّات مُمَكِّنةً إيّاها من الاهتزاز. ولتوضيح هذه الفكرة نتأمّل في جزيء ثنائي الذرّات مثل 1H-35Cl:



تمثّل r0 في الرسم أعلاه طول الرابطة بين الكلور والهيدروجين (bond length) وهي متوسّط المسافة بين نواتي الذرّتين (internuclear distance)، وهي كذلك طول النابض الذي يمثّل الرابطة. ونستطيع أن نثبت أنّه، ولتسهيل الأمر، يمكن الاستعاضة في هذا النموذج عن الذرّتين المعنيّتين بجسم واحد فقط يرتبط بأحد طرفي النابض، في حين يكون طرف النابض الآخر متّصلاً بالحائط، وعليه تصبح المسألة متعلّقة بحركة جسم واحد بدلاً من حركة جسمين، ويكون مقدار استطالة هذا الجسم مساوياً لمقدار التغيّر في طول الرابطة بين الذرّتين نتيجة اهتزازهما مبتعدين ومقتربين من بعضهما. أمّا كتلة هذا الجسم الواحد فتسمّى بالكتلة المختَزَلة (reduced mass) ويرمز لها بالرمز • وتُحسب على النحو التالي:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \qquad \Rightarrow \qquad \mu = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2}$$

تدريب (3): احسب التردّد الذي يهتزّ به جزيء 1H-35Cl إذا علمت أنّ ثابت قوّة الرابطة بين ذرّتي الهيدروجين والكلور هو 476 Nm-1!

$$m_1 = m_H = \frac{M_H}{N_{av}} = \frac{1g\, mol^{-1}}{6.02\times10^{23}\, mol^{-1}} = 1.661\times10^{-24} g = 1.661\times10^{-27} kg$$

$$m_2 = m_{Cl} = \frac{M_{Cl}}{N_{av}} = \frac{35\, g\, mol^{-1}}{6.02\times10^{23}\, mol^{-1}} = 5.814\times10^{-23} g = 5.814\times10^{-26} kg$$

$$\mu = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} = 1.615\times10^{-27} kg$$

$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{\mu}} = \frac{1}{6.28}\sqrt{\frac{476\, Nm^{-1}}{1.615\times10^{-27} kg}} = \frac{1}{6.28}\sqrt{\frac{476 kgms^{-2} m^{-1}}{1.615\times10^{-27} kg}} = 8.65\times10^{13} s^{-1}$$

ويفيد الجواب أنّ ذرّتي الكلور والهيدروجين خلال اهتزازهما يقومان بما يقرب من مئة مليون مليون دورة في الثانية الواحدة!!!!

تدريب (4): إذا كان التردّد الأساسي لجزيء أوّل أكسيد الكربون (CO) هو 2170 cm-1، وكان التردد الأساسي لجزيء أوّل أكسيد النيتروجين (NO) هو 1904 cm-1، فأيّ الرابطتين تكون أقوى، في CO أم في NO؟

المطلوب في السؤال هو تحديد قيمة ثابت القوّة k بالنسبة للرابطتين باستخدام المعادلة (4.3)، وكلّما كانت k أكبر كانت الرابطة أقوى والعكس صحيح.

لكن يجب التنبّه إلى أنّ التردّد قد أعطي بوحدة cm-1 وليس بوحدة s-1. يسمّى التردّد عندما يُعطى بوحدة cm-1 بالعدد الموجي ($\tilde{\nu}$) والذي يعرّف بأنّه مقلوب الطول الموجي وتكون العلاقة بينه وبين التردّد على النحو التالي:

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c} \qquad (c = \nu \cdot \lambda)$$

الخطوة الأولى في الحلّ هي إذاً حساب التردد • بوحدة s-1، ومن ثمّ k.

$$\nu_{CO}^{o} = \tilde{\nu} \cdot c = 2170\, cm^{-1} \times 3.0 \times 10^{10} cm \cdot s^{-1} = 6.51 \times 10^{13} s^{-1}$$
$$\nu_{NO}^{o} = \tilde{\nu} \cdot c = 1904\, cm^{-1} \times 3.0 \times 10^{10} cm \cdot s^{-1} = 5.71 \times 10^{13} s^{-1}$$

معادلة شرودنجر للمهتزّ التوافقي أحادي الأبعاد

لمعرفة ماذا تقول نظرية الكمّ عن المهتزّ التوافقي يجب علينا أوّلاً وضع معادلة شرودنجر الخاصّة بهذا النظام ومن ثَمّ القيام بحلّها، ونبدأ بمعادلة شرودنجر بصورتها العامّة (المعادلة 2.9):

$$\left[-\frac{h^2}{8\pi^2 m}\nabla^2 + V(x,y,z)\right]\psi(x,y,z) = E\psi(x,y,z)$$
$$\left[-\frac{h^2}{8\pi^2 m}\frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x)\right]\psi(x) = E\psi(x)$$
$$\left[-\frac{h^2}{8\pi^2 \mu}\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{1}{2}kx^2\right]\psi(x) = E\psi(x)$$

لتبسيط المعادلة الأخيرة نلجأ إلى تعويض x لتصبح على الصورة

$$x = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} y = \alpha^{-1/2} y$$

حيث أنّ y عدد لا وحدة له، وتصبح بذلك معادلة شرودنجر بدلالة y على النحو التالي:

$$-\frac{h^2 \alpha}{8\pi^2 \mu} \frac{\partial^2 \psi(y)}{\partial y^2} + \frac{1}{2} k \alpha^{-1} y^2 \psi(y) = E\psi(y) \quad (4.4)$$

وحيث أنّ كلّ حدّ في المعادلة الأخيرة يحتوي على (y)• فإنّ وحدة (y)• لا تهمّ. إلاّ أنّنا

نلاحظ أنّ • في طرف المعادلة الأيمن مضروب بالطاقة ممّا يعني أنّ كلاً من $\frac{1}{2} k \alpha^{-1} y^2$

و $-\frac{h^2 \alpha}{8\pi^2 \mu}$ يجب أن تكون لها وحدات طاقة لتستقيم الوحدات على طرفي المعادلة.

ونستطيع اختيار قيمة الثابت • بعناية لتكون مُعاملات $y^2\psi(y)$ و $\partial^2\psi(y)/\partial y^2$ متساوية:

$$\frac{h^2 \alpha}{8\pi^2 \mu} = \frac{1}{2} k \alpha^{-1}$$

$$\alpha^2 = \frac{4\pi^2 \mu k}{h^2} \qquad \Rightarrow \qquad \alpha = \frac{2\pi}{h} \sqrt{\mu k}$$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \qquad k = \mu \omega^2$$

$$\alpha = \frac{\mu \omega}{\hbar}$$

وتكون بذلك وحدة الطاقة المضروبة بـ $y^2\psi(y)$ أو بـ $\partial^2\psi(y)/\partial y^2$ هي

$$\frac{1}{2}k\alpha^{-1}=\frac{1}{2}k\left(\frac{h}{2\pi}\frac{1}{\sqrt{\mu k}}\right)=\frac{1}{2}h\left(\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{\mu}}\right)=\frac{1}{2}h\nu$$

وتكون الطاقة الكلّيّة للنظام من مضاعفات هذه الوحدة

$$E=const\times\left(\frac{1}{2}h\nu\right)$$

ويتمّ كتابة الثابت على الصورة (2n+1) حيث أنّ n عدد غير مقيّد لا وحدة له

$$E=\frac{1}{2}h\nu(2n+1)$$

وقد اختيرت هذه الصورة للثابت وذلك لتحويل معادلة شرودنجر (المعادلة 4.4) إلى صورة مألوفة رياضيّاً وهي ما يعرف بمعادلة هيرميت التفاضلية (Hermite Differential Equation)

$$f''(y)-2y\,f'(y)+2n\,f(y)=0$$

$$\psi(y)=f(y)\cdot e^{-\frac{y^2}{2}}$$

لتكون الدوالّ التي نحصل عليها عند حلّ معادلة هيرميت التفاضلية مقبولةً كدوالّ موجيّة يجب أنْ تتحقّق الشروط المذكورة في الصفحات 38-40، وهذا لا يتأتّى إلاّ إذا كانت n عدداً صحيحاً غير سالب (n=0, 1, 2, 3, ...)، وتكون الدالّة الموجيّة على الشكل:

$$\psi(y) = N_n \cdot H_n(y) \cdot e^{-y^2/2}$$

أمّا Hn(y) فتعرف باسم متعدّدة حدود هيرميت (Hermite polynomials) وقيمها موضّحة في الجدول التالي، و Nn هو الثابت الذي يحقّق شرط العياريّة وصيغته العامّة هي:

$$N_n = \left[\left(\frac{1}{\pi} \right)^{1/2} \frac{1}{2^n \cdot n!} \right]^{1/2}$$

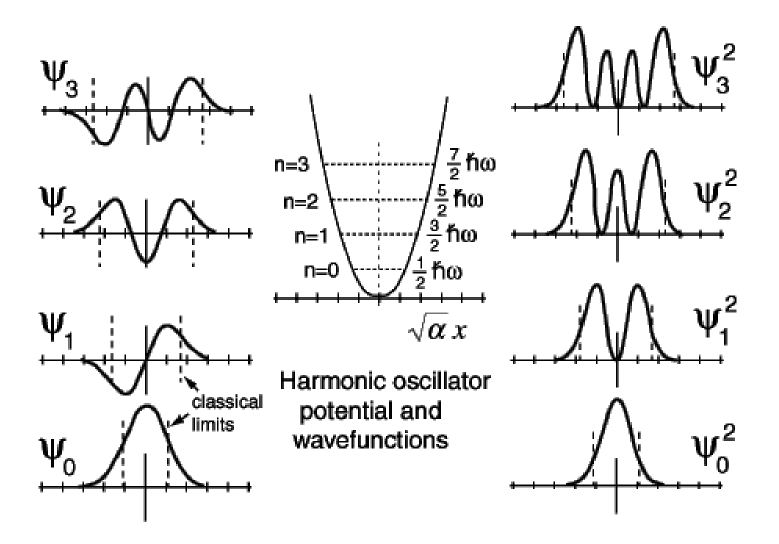
تكون طاقة الاهتزاز (vibrational energy) منفصلة لا متّصلة وتعتمد على عدد كم الاهتزاز n (vibrational quantum number):

$$E_n = h\nu_0\left(n + \frac{1}{2}\right) = \hbar\omega_0\left(n + \frac{1}{2}\right) \quad (4.5)$$

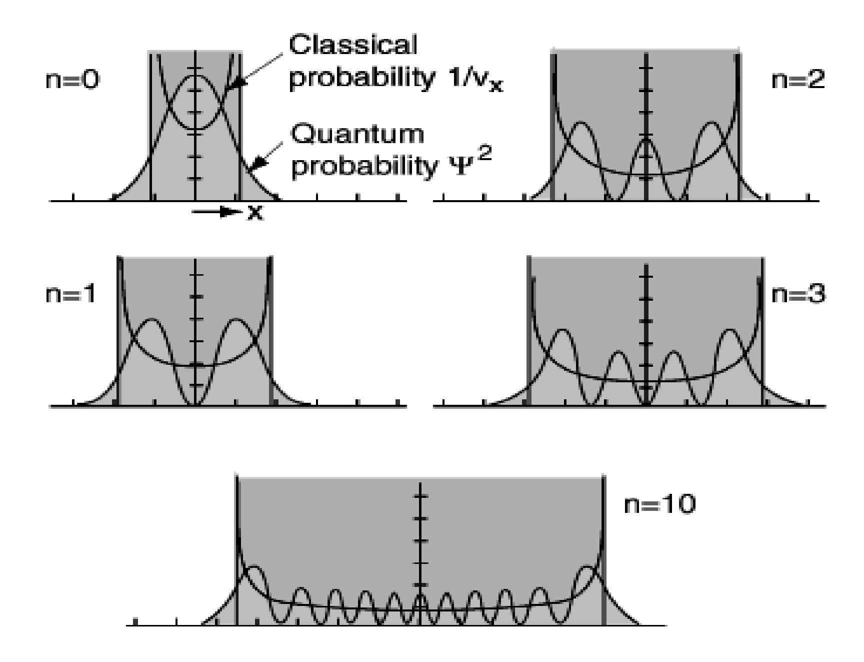
هذا بخلاف الفيزياء التقليدية حيث طاقة الاهتزاز متّصلة وقد تحمل أيّة قيمة لأنّها تعتمد أوّلاً وأخيراً على مقدار الاستطالة الابتدائية x0 والتي لا قيود على القيم التي يمكن أنْ تأخذها.

n	•n	Hn	En
•	$\left(\frac{1}{\pi}\right)^{1/4}$	•	$\frac{1}{2}\hbar\omega_0$
•	$\frac{1}{\sqrt{2}}\left(\frac{1}{\pi}\right)^{1/4}$	•y	$\frac{3}{2}\hbar\omega_0$
•	$\frac{1}{\sqrt{8}}\left(\frac{1}{\pi}\right)^{1/4}$	4y2-2	$\frac{5}{2}\hbar\omega_0$
•	$\frac{1}{\sqrt{48}}\left(\frac{1}{\pi}\right)^{1/4}$	•y3-12y	$\frac{7}{2}\hbar\omega_0$
•	$\frac{1}{\sqrt{384}}\left(\frac{1}{\pi}\right)^{1/4}$	16y4-48y2+12	$\frac{9}{2}\hbar\omega_0$
•	$\frac{1}{\sqrt{3840}}\left(\frac{1}{\pi}\right)^{1/4}$	32y5-160y3+120y	$\frac{11}{2}\hbar\omega_0$

ونجد في الشكل التالي نتائج ميكانيكا الكم الخاصّة بالمهتزّ التوافقي أحادي لأبعاد موضّحة:



ونستنبط من الرسم السابق وجهاً آخر للاختلاف بين الفيزياء التقليدية وميكانيكا الكم، ففي حين تقرّر الفيزياء التقليدية أنّ احتمال تواجد الكرة المهتزّة يكون أكبر ما يكون عند الأطراف (قيم استطالة كبيرة، سالبة أو موجبة) حيث تكون سرعة الكرة أقلّ ما تكون ويكون بالتالي الزمن الذي تُقضّيه الكرة عند الأطراف كبيراً، نجد أنّ نتائج ميكانيكا الكم تشير إلى أنّ احتمال تواجد الكرة يكون في مستويات الطاقة الدنيا (مثل n=0) أكبر ما يكون في الوسط، أي عند قيم استطالة حول x=0، كما هو واضح من مربع الدالة الموجية. وتلتقي الفيزياء التقليدية وميكانيكا الكم عند مستويات الطاقة العليا كما يقتضي مبدأ التطابق (ص56).



لو دقّقنا النظر في الرسمين الأخيرين لوجدنا أنّ مربّع الدالة الموجية •• يتجاوز نقطتي الاستطالة القصوى x0 و x0- ممّا يعني أنّ هنالك احتمالاً أن تتواجد الكرة خلال اهتزازها بعد نقطة الاستطالة الابتدائية. تسمّى هذه الظاهرة بالاختراق النفقي (Tunneling) وهو أمر غريب جدّاً لا مثيل له في عالم الفيزياء التقليدية، بل وتعتبره الفيزياء التقليدية مرفوضاً لخرقه قانون حفظ الطاقة! فالطاقة الكلّيّة كما ورد ذكره من قبل تساوي $E_{total} = \frac{1}{2} k x_0^2$ ،

ولو جاوَزَتْ الكرة النقطة x0 فهذا يعني زيادةً في طاقتها ولكنّ الطاقة لا تأتي من العدم، لهذا لا يمكننا –حسب الفيزياء التقليدية- تصوّر أن تجاوز الكرة النقطتين x0- وx0.

بالرغم من صعوبة تصديق حصول مثل هذا الأمر الذي تتنبّأ به ميكانيكا الكم إلاّ أنّ قيام العلماء بتطوير تقنيات مبدؤها ظاهرة الاختراق النفقي يقطع كلّ شكوك، نذكر منها على سبيل المثال الميكروسكوب النفقي المسحي (scanning tunneling microscope) والذي أمكن بواسطته رؤية ذرّات سطوح المواد الصلبة.

تدريب (5): برهن على أنّ الدالّة الموجيّة •• هي دالّة مميّزة بالنسبة إلى مؤثّر الطاقة الهاميلتوني. جِد القيمة المميزة!

تدريب (6): احسب احتمالية أن يتجاوز مهتزّ توافقي في مستوى الطاقة الصفري قيم الاستطالة القصوى.

نحسب أولاً احتمال تجاوُزِ المهتزّ للنقطة x0، ويكون احتمال تجاوز النقطة x0– مساوياً لاحتمال تجاوز النقطة x0 بسبب تماثل الدالّة.

$$P_{>x_0} = \int_{x_0}^{\infty} \psi_n^2(x)dx = \int_{y_0}^{\infty} \psi_n^2(y)dy = \int_{y_0}^{\infty} \left[N_n H_n(y) e^{-\frac{y^2}{2}} \right]^2 dy$$

$$P_{>x_0} = \int_{y_0}^{\infty} \left[N_0 H_0(y) e^{-\frac{y^2}{2}} \right]^2 dy = \int_{y_0}^{\infty} \left[\left(\frac{1}{\pi} \right)^{1/4} e^{-\frac{y^2}{2}} \right]^2 dy = \left(\frac{1}{\pi} \right)^{1/2} \int_{y_0}^{\infty} e^{-y^2} dy$$

ولكن

$$E_0 = \frac{1}{2} k\, x_0^2 = \frac{1}{2} k\, \alpha^{-1} y_0^2 \qquad\qquad E_0 = h\nu \left(n + \frac{1}{2} \right)$$

$$\frac{1}{2} k\, \alpha^{-1} y_0^2 = h\nu \left(n + \frac{1}{2} \right)$$

$$y_0^2 = 2 \frac{h\nu\, \alpha}{k} \left(n + \frac{1}{2} \right) = 2 \frac{h\nu \;\; \mu\omega}{\mu\omega^2\, \hbar} \left(n + \frac{1}{2} \right) = (2n+1)$$

$$y_0 = \sqrt{(2n+1)}$$

إذاً

$$P_{>x_0} = \left(\frac{1}{\pi} \right)^{1/2} \int_{\sqrt{2n+1}}^{\infty} e^{-y^2} dy$$

$$P_{total} = 2P_{>x_0} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\sqrt{2n+1}}^{\infty} e^{-y^2} dy = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{1}^{\infty} e^{-y^2} dy = 1 - erf(1) = 0.1573$$

حيث أنّ erf هي ما يسمّى بدالّة الخطأ (error function)، وهذا نابع من أنّ الدالة e^{-y^2} هي أساس دالّة التوزيع الطبيعي (normal distribution function) أو دالّة توزيع جاوس (Gauss distribution function) والتي تستخدم في وصف الخطأ التجريبي المرتبط بالقياسات وفي تحديد الانحراف المعياري (standard deviation) ومقدار التشتّت (variance) (انظر الكيمياء التحليليّة). أمّا قيم دالّة الخطأ فهي مجدولة ومنها استقينا القيمة أعلاه.

وتشير نتيجة التدريب السابق إلى أنّ المهتز التوافقي الموجود في مستوى الطاقة الصفري ينفق ما يقرب من 16% من وقته في المنطقة الممنوعة كلاسيكيّاً حيث يمتلك طاقة أعلى من تلك التي تسمح بها الفيزياء التقليدية، وهي قيمة لا يُستهان بها البتّة. ويوضّح الجدول التالي أنّ احتمال تواجد المهتز التوافقي في المنطقة الممنوعة كلاسيكيّاً يتناقص بازدياد n ويؤول إلى الصفر عندما تؤول n إلى المالانهاية (n⟶∞) ممّا يتّفق مع مبدأ التطابق.

n	0	1	2	3	4
P	0.1573	0.1116	0.0951	0.0855	0.0785

طاقة نقطة الصفر (Zero-point energy)

حسب النظرية الحركيّة للغازات فإنّ الطاقة الحركيّة لجزيئات الغاز تتناسب تناسباً طردياً مع درجة حرارته. ماذا يحدث لو برّدنا الغاز إلى درجة حرارة الصفر المطلق؟ ستتوقّف جزيئات الغاز بالضرورة عن الحركة! هذا ما يتنبّأ به أيضاً القانون الثالث للديناميكا الحراريّة والذي ينصّ على أنّ العشوائيّة (entropy) تكون صفراً عند درجة حرارة الصفر المطلق، ممّا يعني أنّه لا حركة عند هذه الدرجة.

تُفاجِئنا ميكانيكا الكم بأن ذرّات الموادّ الصلبة وكذلك ذرّات الجزيئات متعدّدة الذرّات لا تتوقّف عن الحركة عند درجة حرارة الصفر المطلق، ويدلّ على ذلك أنّ الطاقة الاهتزازية حسب المعادلة (4.4) لا يمكن أن تساوي صفراً لأنّ أصغر قيمة لعدد الكم الاهتزازي n هو صفر،•وأقلّ طاقة اهتزازيّة بالتالي هي $E_0 = \frac{1}{2}\hbar\omega_0$. وفي حقيقة الأمر فإنّ التوقّف عن الحركة يتعارض مع مبدأ عدم التحديد لأنّ الذرّات بتوقّفها عن الحركة تصبح سرعتها معلومةً بدقّة (ومقدارها صفر) ويصبح كذلك المكان الذي تتواجد فيه معلوماً بدقة. وسنرى فيما يلي كيف أنّ طاقة الصفر يمكن اشتقاقها من مبدأ عدم التحديد:•

تتألّف الطاقة الكلّية للمهتز التوافقي من مجموع طاقة الوضع وطاقة الحركة:

$$E = E_{pot} + E_{kin}$$

$$E = \frac{1}{2}k\,x^2 + \frac{1}{2}m v^2$$

أقلّ طاقة يمكن أنْ يمتلكها هذا المهتز يحدّدها مقدار الشكّ في قيمة العزم الخطّي وفي قيمة الموقع:

$$E = \frac{1}{2}k\left(\Delta x\right)^2 + \frac{1}{2}m\left(\Delta v\right)^2$$

نعوّض في المعادلة أعلاه أقلّ قيمة ممكنة للخطأ في قيمة العزم الخطي وفي قيمة الموقع:

$$\Delta p = \frac{h}{4\pi\,\Delta x} = \frac{\hbar}{2(\Delta x)} \qquad \Rightarrow \qquad \Delta v = \frac{\hbar}{2\,m\cdot\Delta x}$$

$$E = \frac{1}{2}k\left(\Delta x\right)^2 + \frac{\hbar^2}{8m}\frac{1}{\left(\Delta x\right)^2}$$

نحدّد القيمة الدنيا للطاقة بإيجاد المشتقة الأولى لمعادلة الطاقة أعلاه بالنسبة لـx• وتُسوّى المشتقة بصفر ونحدّد من ثَمّ قيمة x• التي تكون عندها قيمة الطاقة قيمةً دنيا:

$$k(\Delta x) - \frac{\hbar^2}{4m} \cdot \frac{1}{(\Delta x)^3} = 0$$

$$(\Delta x)^4 = \frac{\hbar^2}{4mk}$$

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \qquad \Rightarrow \qquad k = m\omega^2$$

$$(\Delta x)^2 = \sqrt{\frac{\hbar^2}{4mk}} = \sqrt{\frac{\hbar^2}{4m^2\omega^2}} = \frac{\hbar}{2m\omega}$$

تعوّض x• في معادلة الطاقة:

$$E = \frac{1}{2}k(\Delta x)^2 + \frac{\hbar^2}{8m}\frac{1}{(\Delta x)^2} = \frac{1}{2}m\omega^2\frac{\hbar}{2m\omega} + \frac{\hbar^2}{8m}\frac{2m\omega}{\hbar} = \frac{1}{4}\hbar\omega + \frac{1}{4}\hbar\omega = \frac{1}{2}\hbar\omega$$

من الجدير ذكره أنّ طاقة نقطة الصفر تلك هي المسؤولة عن عدم تجمّد الهيليوم السائل تحت الضغط الجوّي مهما انخفضت درجة حرارته.

تدريب (7): احسب طاقة نقطة الصفر لجزيء 1H-35Cl (تدريب 3).

$$E_0 = \frac{1}{2}h\nu_0 = \frac{1}{2} \times 6.6 \times 10^{-34} Js \times \left(8.65 \times 10^{13} s^{-1}\right) = 2.85 \times 10^{-20} J$$

تدريب (8): احسب طاقة نقطة الصفر لجزيء D-35Cl، إذا كان له نفس ثابت قوة الرابطة الخاص بجزيء 1H-35Cl.

ذرّة الهيدروجين

ذرّة الهيدروجين (أو شبيهات ذرّة الهيدروجين) هي أبسط أنواع الذرّات، تتكوّن من جسيمين فقط: إلكترون يدور حول النواة منجذباً إليها بواسطة القوى الكولوميّة. لمعرفة صفات هذا الإلكترون المختلفة (الطاقة، السرعة، المكان الذي يتواجد فيه، ....الخ) يجب علينا القيام بحلّ معادلة شرودنجر لذرّة الهيدروجين والتي يمكن كتابتها على النحو التالي:

$$\left(-\frac{h^2}{8\pi^2 m}\nabla^2 + V\right)\psi(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2) = E\psi(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2)$$

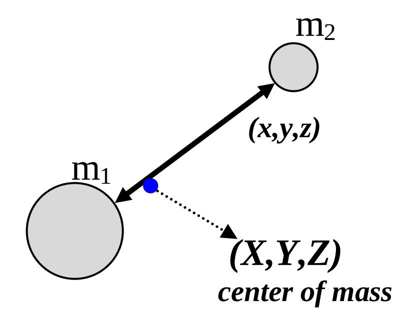
حيث أنّ الإحداثيّات (x1,y1,z1) تمثّل إحداثيّات الإلكترون و(x2,y2,z2) تمثّل إحداثيّات النواة، أمّا • فهي الدالة الموجيّة الكلّيّة. يتعذّر حال معادلة شرودنجر بهذه الصورة حيث أنّ الدالة الموجيّة الكلية تعتمد على ستّ متغيّرات، ولكنّنا نستطيع بالقليل من المجهود الرياضي أن نقسّم الدالة الكلية إلى دالّتين فرعيّتين:

$$\psi(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2) = \psi(X, Y, Z)\cdot\psi(x, y, z)$$

(5.1)

الدالة الفرعيّة الأولى (X,Y,Z)• تعتمد فقط على إحداثيّات مركز الثقل (center of mass)، أي تلك النقطة التي تتوزّع حولها كتلة الجسم "بتساوٍ" ويمكننا بذلك أن نعتبرها ممثّلاً عن الجسم كلّه إذا أردنا أن نفرضه نقطة واحدة في الفضاء. هذه الدالّة الفرعية ليست ذات أهمّية بالنسبة إلينا إذ إنّها تمثّل حركة الجزيء الإنسحابيّة في الفضاء (translational motion)، ويمكننا بذلك حذفها من معادلة شرودنجر.

أمّا الدالّة الفرعيّة الثانية (x,y,z)• فتعتمد على المسافة الفاصلة بين الإلكترون والنواة، وهي الدالة محلّ اهتمامنا لأنّها تصف حركة الإلكترون حول النواة.



وبتعويض المعادلة (5.1) في معادلة شرودنجر نحصل على:

$$\left(-\frac{h^2}{8\pi^2\mu}\nabla^2+V\right)\psi(X,Y,Z)\cdot\psi(x,y,z)=E\psi(X,Y,Z)\cdot\psi(x,y,z)$$

$$\left(-\frac{h^2}{8\pi^2\mu}\nabla^2+V\right)\psi(x,y,z)=E\psi(x,y,z) \qquad ....(5.2)$$

ونكون بهذا التعويض كأنّنا ثبّتنا الجزيء في الفضاء ومنعناه من الحركة وقمنا بدراسة حركة الإلكترون حول النواة الثابتة والتي يمكن اعتبارها موجودة في نقطة الأصل لنظام الإحداثيّات. كما نلاحظ في المعادلة الأخيرة أنّه قد تمّ -نتيجةً لتقسيم الدالّة الموجيّة الكلية إلى الدالّتين الفرعيّتين حسب المعادلة 5.1- استبدال الكتلة m في المعادلة الأصلية بالكتلة المختزلة • (reduced mass) حيث أنّ

$$\frac{1}{\mu}=\frac{1}{m_1}+\frac{1}{m_2}+\frac{1}{m_3}+\ldots$$

$$For\ two-particle\ system: \quad \frac{1}{\mu}=\frac{1}{m_1}+\frac{1}{m_2} \qquad \Rightarrow \qquad \mu=\frac{m_1\cdot m_2}{m_1+m_2}$$

وتكون بذلك الكتلة المختزلة لذرّة الهيدروجين قريبةً جدّاً من كتلة الإلكترون:

$$\mu=\frac{m_e\cdot m_n}{m_e+m_n}\approx\frac{m_e\cdot m_n}{m_n}=m_e$$

ونرجع إلى معادلة شرودنجر التي تصف حركة الإلكترون حول النواة الثابتة (المعادلة 5.2) لنعوّض فيها الطاقة الوضعية (V) للإلكترون الواقع تحت تأثير الحقل الكهربائي للنواة:

$$V=-\frac{Ze^2}{4\pi\,\varepsilon_0\,r}$$

فتصبح معادلة شرودنجر على النحو التالي:

$$\left(-\frac{h^2}{8\pi^2\mu}\nabla^2 - \frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r}\right)\psi(x,y,z) = E\psi(x,y,z)$$

المشكلة التي سنواجهها عند محاولتنا حلّ المعادلة الأخيرة هي أنّه لا يمكننا فصل المتغيّرات x و y و z عن بعضها بسبب وجود r في طاقة الوضع، ولذلك نلجأ إلى نقل المسألة من نظام الإحداثيّات الديكارتي بمتغيّراته x و y و z إلى نظام الإحداثيّات الكروي بمتغيّراته r و • و •. يمثّل الرسم التالي العلاقة بين متغيَرات

وبناءَ على الرسم أعلاه، فإنّ أيّة نقطة في الفضاء (x,y,z) يمكن تعريفها بواسطة بعد هذه النقطة عن مركز الأصل (r)، والزاوية • التي يصنعها الخط الواصل بين هذه النقطة ونقطة الأصل وبين المحور z، والزاوية • الواقعة بين إسقاط الخط الواصل بين هذه النقطة ونقطة الأصل وبين محور السينات x.

لتحويل معادلة شرودنجر من النظام الديكارتي إلى النظام الكروي يجب علينا أن نحدّد المشتقات الثانية بالنسبة لـ x وy و z ($\frac{\partial^2}{\partial x^2}$، $\frac{\partial^2}{\partial y^2}$، $\frac{\partial^2}{\partial z^2}$) بدلالة r و • و •، وليس هذا بالأمر الصعب إذ كلّ ما علينا فعله هو إيجاد المشتقة الأولى حسب ما هو مبيّن أسفل الصفحة السابقة مقابل الرسم ومن ثمّ إيجاد المشتقة الثانية بنفس الطريقة، إلاّ أنّ الاشتقاق المطلوب طويل جدّاً ومرهق ولذلك فإنّنا ننتقل إلى النتيجة النهائية مباشرة:

$$\nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin\theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2\theta} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2}$$

وتصبح بذلك معادلة شرودنجر على النحو التالي:

$$\left(-\frac{h^2}{8\pi^2 \mu} \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin\theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2\theta} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} \right] - \frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r} \right) \psi(r,\theta,\phi) = E\psi(r,\theta,\phi)$$

ونلاحظ الآن أنّ الدالّة الموجية أصبحت بدلالة r و • و •.نرتّب المعادلة لتصبح:

$$\left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin\theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2\theta} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} \right] \psi(r,\theta,\phi) + \frac{8\pi^2 \mu}{h^2} \left(E + \frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r} \right) \psi(r,\theta,\phi) = 0$$

لحلّ هذه المعادلة نقوم بفصل المتغيّرات (variable seperation) حيث نكتب الدالّة الكلّيّة • والتي تعتمد على المتغيّرات الثلاث r و • و • على شكل حاصل ضرب ثلاث دالاّت فرعيّة كلّ واحد منها لا يعتمد إلاّ على متغيّرٍ واحد:

$$\psi(r,\theta,\phi) = R(r) \cdot \Theta(\theta) \cdot \Phi(\phi)$$

نعوّض الدالاّت الفرعية في المعادلة الأخيرة ونحصل على:

$$\left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin\theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2\theta} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} \right] R(r) \cdot \Theta(\theta) \cdot \Phi(\phi)$$

$$+ \frac{8\pi^2 \mu}{h^2} \left(E + \frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r} \right) R(r) \cdot \Theta(\theta) \cdot \Phi(\phi) = 0$$

وبفكّ الأقواس في السطر الأول من المعادلة الأخيرة:

$$\frac{\Theta(\theta)\cdot\Phi(\phi)}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial R(r)}{\partial r}\right)+\frac{R(r)\cdot\Phi(\phi)}{r^2\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial\Theta(\theta)}{\partial\theta}\right)+\frac{R(r)\cdot\Theta(\theta)}{r^2\sin^2\theta}\frac{\partial^2\Phi(\phi)}{\partial\phi^2}$$
$$+\frac{8\pi^2\mu}{h^2}\left(E+\frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r}\right)R(r)\cdot\Theta(\theta)\cdot\Phi(\phi)=0$$

وبقسمة المعادلة الأخيرة على $R(r)\cdot\Theta(\theta)\cdot\Phi(\phi)$ وضربها بـr2 و sin2•:

$$\frac{\sin^2\theta}{R(r)\cdot}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial R(r)}{\partial r}\right)+\frac{\sin\theta}{\Theta(\theta)}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial\Theta(\theta)}{\partial\theta}\right)+\frac{1}{\Phi(\phi)}\frac{\partial^2\Phi(\phi)}{\partial\phi^2}+\frac{8\pi^2\mu\, r^2\sin^2\theta}{h^2}\left(E+\frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r}\right)=0$$

ثمّ نجمّع الحدود:

$$\frac{\sin^2\theta}{R(r)\cdot}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial R(r)}{\partial r}\right)+\frac{8\pi^2\mu\, r^2\sin^2\theta}{h^2}\left(E+\frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r}\right)+\frac{\sin\theta}{\Theta(\theta)}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial\Theta(\theta)}{\partial\theta}\right)=-\frac{1}{\Phi(\phi)}\frac{\partial^2\Phi(\phi)}{\partial\phi^2}$$

(5.3)

المعادلة الأخيرة في غاية الأهمّية:

الحدود إلى يسار المعادلة لا تعتمد إلاّ على r و • فقط، في حين يعتمد الحدّ الوحيد إلى يمين المعادلة على • فقط. ماذا سيحدث إذا حاولنا مثلاً تغيير r؟ حيث أنّ يمين المعادلة لا يعتمد على r فإنّه سيبقى ثابتاً، وهذا يعني أنّ مجموع الحدود الثلاثة يسار المعادلة ثابت بالضرورة مهما غيّرنا في قيمة r. نفس المنطق ينطبق أيضاً على • و •. نستنتج من ذلك أنّ المقدار على يمين المعادلة ثابت، وكذلك المقدار على يسار المعادلة، ولنكتب هذا الثابت على الصورة m2 حيث أنّ m هو عدد ما لا قيود على قيمته.

حلّ معادلة فاي (•-equation)

لنكتب ما استنتجناه فوق على شكل معادلة رياضية:

$$-\frac{1}{\Phi(\phi)}\frac{\partial^2\Phi(\phi)}{\partial\phi^2}=m^2 \qquad \Rightarrow \qquad \frac{\partial^2\Phi(\phi)}{\partial\phi^2}=-m^2\cdot\Phi(\phi)$$

(5.4)...

من الواضح أنّ المعادلة الأخيرة هي معادلة قيمة مميّزة ومن السهل معرفة أنّ الدالّة $\Phi(\phi)=A\cdot e^{im\phi}$ هي دالّة مميّزة (تحقّق بنفسك من صلاحية المعادلة الفائتة كحلّ لمعادلة القيمة المميّزة). نحاول الآن معرفة قيمة الثابت A لتكون الدالة عياريّة:

$$\int_0^{2\pi}\Phi^*(\phi)\cdot\Phi(\phi)\,d\phi=1 \qquad \int_0^{2\pi}Ae^{-im\phi}\cdot Ae^{im\phi}\;d\phi=1$$

$$A^2\int_0^{2\pi}d\phi=1 \qquad A^2\,(2\pi)=1 \qquad A=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}$$

نلاحظ أنّنا في التكامل أعلاه جعلنا حدود التكامل من 0 إلى •2، لأنّ هذه هي الحدود التي تتحرّك فيها الزاوية •. لنفرض أنّ الخط المُسقَط (ص76) موجود بالضبط فوق محور السينات، عندها تكون الزاوية • صفراً. عندما يبدأ الخط المسقط بالدوران حول المحور z تكبر •شيئاً فشيئاً حتى تكتمل الدورة (•2=360°). أيّة دورة أخرى هي في حقيقة الأمر مجرّد إعادة للدورة الأولى ممّا يعني أنّ •تعيد نفسها.

بناءَ على ما تقدّم، وحيث أنّ الدالّة الموجيّة يجب أن تكون أحاديّة القيمة، فإنّ قيمة الدالّة • عند الزاوية • يجب أن تكون مساويةً لقيمتها عند الزاوية ••••، لأنّهما في حقيقة الأمر نفس الزاوية. رياضيّاً نكتب ذلك كما يلي:

$$\Phi(\phi) = \Phi(\phi + 2\pi)$$
$$A \cdot e^{im\phi} = A \cdot e^{im(\phi+2\pi)} = A \cdot e^{im\phi} \cdot e^{i\,m\,2\pi}$$
$$e^{i\,m\,2\pi} = 1$$
$$\cos(2\pi\,m) + i\,\sin(2\pi\,m) = 1$$
$$\cos(2\pi\,m) = 1$$
$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \ldots\ldots$$

من الواضح أنّ شرط أحاديّة القيمة وضع قيوداً على القيم المسموح ml أن تأخذها فأصبحت m بذلك عدد كم (quantum number).

حلّ معادلة ثيتا (•-equation)

نعوّض المعادلة (5.4) في المعادلة (5.3)، نقسم على •sin2 فنحصل على:

$$\frac{1}{R(r)\cdot}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial R(r)}{\partial r}\right)+\frac{8\pi^2\mu r^2}{h^2}\left(E+\frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r}\right)+\frac{1}{\Theta(\theta)\cdot\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial\Theta(\theta)}{\partial\theta}\right)=\frac{+m^2}{\sin^2\theta}$$

نُرتّب المعادلة:

$$\frac{1}{R(r)\cdot}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial R(r)}{\partial r}\right)+\frac{8\pi^2\mu r^2}{h^2}\left(E+\frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r}\right)=\frac{+m^2}{\sin^2\theta}-\frac{1}{\Theta(\theta)\cdot\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial\Theta(\theta)}{\partial\theta}\right)$$

حيث أنّ تغيير r لا يغيّر طرف المعادلة اليمين، كما أنّ تغيير • لا يغيّر طرف المعادلة اليسار، لا بدّ إذاً أن يكون طرفا المعادلة ثابتاً ولنكتب هذا الثابت على الصورة l(l+1):

$$\frac{1}{R(r)\cdot}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial R(r)}{\partial r}\right)+\frac{8\pi^2\mu r^2}{h^2}\left(E+\frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r}\right)=\frac{+m^2}{\sin^2\theta}-\frac{1}{\Theta(\theta)\cdot\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial\Theta(\theta)}{\partial\theta}\right)=l(l+1)$$

(5.5)

$$\frac{+m^2}{\sin^2\theta}-\frac{1}{\Theta(\theta)\cdot\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial\Theta(\theta)}{\partial\theta}\right)=l(l+1) \quad (5.6)....$$

تسمّى المعادلة الأخيرة بمعادلة ثيتا (•-equation)، وهي معادلة مألوفة لدى علماء الرياضيّات وتسمّى معادلة لوجاندر (Legendre) التفاضليّة وحلولها معروفة تحت اسم متعدّدات حدود لوجاندر (Legendre Polynomials) نسبةً إلى عالم الرياضيات لوجاندر. وتضع حلول هذه المعادلة قيوداً على القيم التي يمكن لـ l أن تأخذها لتكون المعادلة صحيحة ولتكون الدالة • مقبولةً كدالّة موجيّة، إذ يجب أن تكون l صفراً أو عدداً صحيحاً موجباً، كما تضع المعادلة قيوداً على القيم التي يمكن لـm أن تأخذها فلا يسمح لها بتجاوز قيمة l.

$$l = 0, 1, 2, 3 .....$$
$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 ... \pm l$$

يوضّح الجدول التالي الحلول المقبولة لـ•• و • عند القيم المختلفة المسموح بها لـ• و l. يُلاحظ أنّنا نستطيع بشكلٍ عام أن نكتب الحلول على الصورة m• و l m•، حيث أنّ الدالّة الفرعيّة •لا تعتمد إلاّ على m أمّا الدالة الفرعيّة • فتعتمد على كلٍّ من m و l.

l	m	•l,m(•)	•m(•)
0	0	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}}$
1	0	$\sqrt{\frac{3}{2}}\cos(\theta)$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}}$
1	•1	$\frac{\sqrt{3}}{2}\sin(\theta)$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{\pm i\varphi}$
2	0	$\sqrt{\frac{15}{8}}\left(3\cos^2\theta-1\right)$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}}$
2	•1	$\sqrt{\frac{15}{4}}\sin\theta\cos\theta$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{\pm i\varphi}$
2	•2	$\sqrt{\frac{15}{16}}\sin^2\theta$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{\pm i2\varphi}$

حلّ معادلة الدالّة القطريّة (R-equation)

من المعادلة (5.5):

$$\frac{1}{R(r)\cdot}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial R(r)}{\partial r}\right)+\frac{8\pi^2\mu r^2}{h^2}\left(E+\frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r}\right)=l(l+1)$$

تسمّى المعادلة أعلاه بمعادلة الدالة القطرية، وبعيداً عن التفصيلات الرياضية وُجد أنّه كي تكون حلول هذه المعادلة مقبولة فيزيائيّاً فيجب أن يتمّ تعويض الطاقة في المعادلة أعلاه على الصورة:

$$E_n = -\frac{\mu Z^2 e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2 n^2} \quad (5.7)....$$

وبتعويض التعبير أعلاه في المعادلة (5.5) نحصل على مايسمّى بمعادلة لاجيرّ (Laguerre) التفاضليّة وحلولها معروفة تحت اسم متعدّدات حدود لاجيرّ (Laguerre Polynomials) نسبةً إلى عالم الرياضيات لاجيرّ (Laguerre). وتضع الحلول قيوداً عل قيم n إذ يجب أن تكون عدداً صحيحاً موجباً، كما تضع المعادلة قيوداً على l فلا تتجاوز القيمة (n-1).

$$n = 1, 2, 3, \ldots$$
$$l = 0, 1, 2, 3, \ldots (n-1)$$

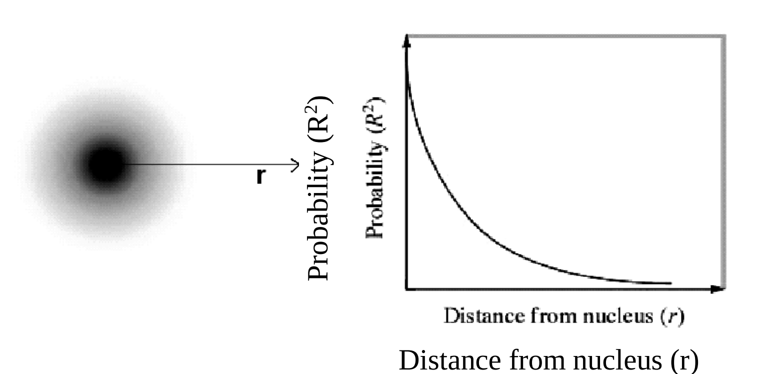
يكتب الحلّ العام لمعادلة الدالّة القطرية على الشكل Rn l، حيث أنّ الدالة القطرية تعتمد على قيمة عدديْ الكمّ n و l. يوضّح الجدول التالي الدالاّت القطرية عند القيم المختلفة لـn و l.

n	l	Rn,l(r)
1	0	$2\left(\frac{Z}{a_0}\right)^{3/2} e^{-\rho/2}$
2	0	$\frac{1}{2\sqrt{2}}\left(\frac{Z}{a_0}\right)^{3/2}(2-\rho)e^{-\rho/2}$
2	1	$\frac{1}{2\sqrt{6}}\left(\frac{Z}{a_0}\right)^{3/2}\rho e^{-\rho/2}$
3	0	$\frac{1}{9\sqrt{3}}\left(\frac{Z}{a_0}\right)^{3/2}\left(6-6\rho+\rho^2\right)e^{-\rho/2}$
3	1	$\frac{1}{9\sqrt{6}}\left(\frac{Z}{a_0}\right)^{3/2}(4-\rho)\rho e^{-\rho/2}$
3	2	$\frac{4}{9\sqrt{30}}\left(\frac{Z}{a_0}\right)^{3/2}\rho^2 e^{-\rho/2}$

في الجدول الفائت: $\rho = \frac{2Z\,r}{a_0}$ ، في حين أنّ a0 هو نصف قطر بور $a_0 = \frac{\varepsilon_0\, h^2}{\pi\, m_e\, e^2}$.

سنحاول الآن أن نوضّح دلالة الدالّة القطريّة R من الناحية الفيزيائية. نعلم أنّ الدالة الموجية•• لا معنى فيزيائيّ لها وإنّما يعطينا مربع الدالة الموجيّة احتمالية تواجد الجسم في حجم غير متناه في ضآلته (d•) في الفضاء. كذلك الأمر بالنسبة للدالّات الفرعية المكوّنة لـ••، وبالنسبة لـ R تحديداً

فإنّ مربّع الدالّة القُطريّة R2 يعبَر عن احتمال تواجد الإلكترون على أيّ خط ينطلق من النواة ويمتدّ إلى المالانهاية. يبيّن الرسم أدناه مربّع الدالة القطرية للفلك 1s، حيث تمثّل كثافة النقاط احتمال تواجد الإلكترون على ذلك البعد r من النواة ونلاحظ أنّه كلّما ابتعدنا عن النواة كلّما نقصت احتمالية تواجد الإلكترون على ذلك الخط أسيّاً (exponentially).

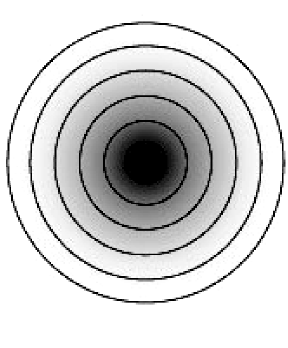


من المفيد أكثر معرفة احتمال تواجد الإلكترون في قشرة كرويّة (spherical shell) رفيعة جدّاً محيطة بالنواة نصف قطرها r. في هذه الحالة يكون الحجم الذي يتواجد فيه الإلكترون هو حجم هذه القشرة والذي يساوي مساحة سطح القشرة (مساحة سطح كرة) مضروبةً بسماكتها dr:

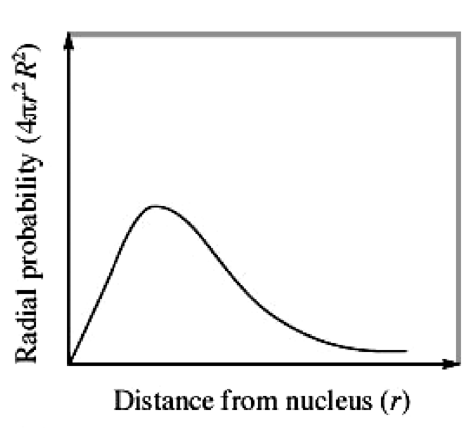
$$d\tau = 4\pi r^2 dr$$

$$P(r) = R^2 d\tau = 4\pi r^2 R^2 dr$$

$$\frac{P(r)}{dr} = 4\pi r^2 R^2 \qquad \textit{Radial Probability Distribution}$$

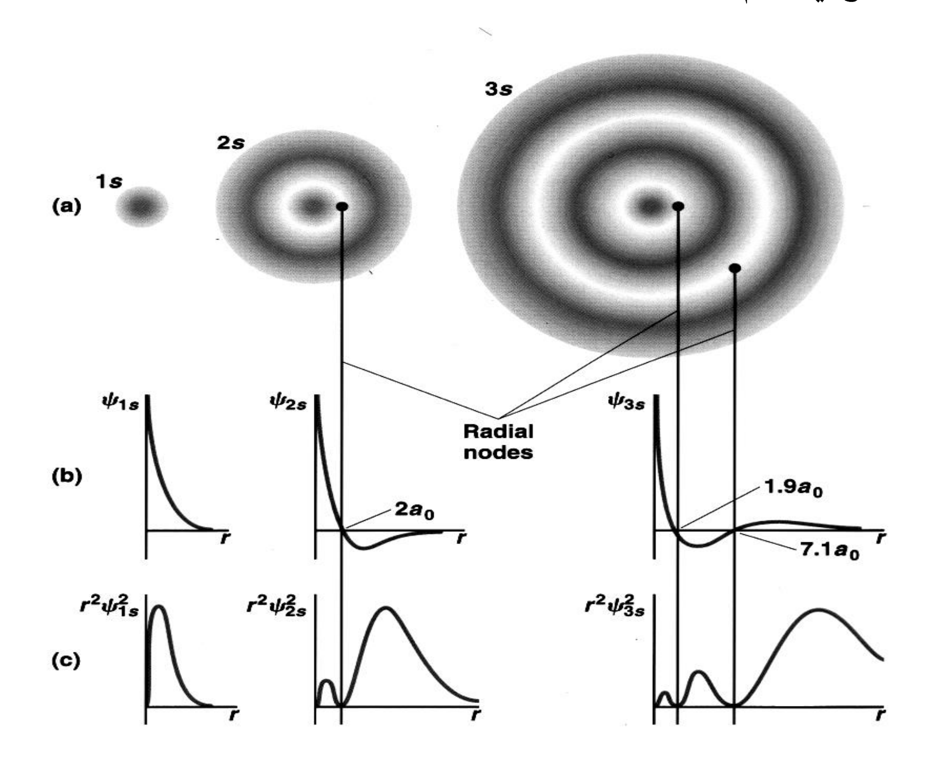






(b)

ويسمّى المنحنى الذي نحصل عليه بهذه الطريقة بتوزيع الاحتمالية القطريّة وهو موّضح في الرسم أعلاه للفلك 1s.



ونجد في الرسم أعلاه الدالاّت الموجية وتوزيع الاحتماليّة القطرية للأفلاك 1s, 2s, 3s، ويلاحظ في الأفلاك 2s, 3s وجود العُقَد حيث لا يتواجد الإلكترون البتة.

تدريب (1): احسب نصف قطر القشرة التي يكون احتمال تواجد إلكترون 1s في ذرّة الهيدروجين فيها أكبر ما يكون.

$$\frac{d\left(4\pi r^2 R^2\right)}{dr}=0 \qquad (\max imum)$$

$$R^2=\left(2\left(\frac{Z}{a_0}\right)^{3/2}e^{-\rho/2}\right)^2=\frac{4Z^3}{a_0^3}e^{-\rho}=\frac{4Z^3}{a_0^2}e^{-2Zr/a_0}$$

$$Z=1 \qquad R^2=\frac{4}{a_0^3}e^{-2r/a_0}$$

$$\frac{d\left(4\pi r^2 R^2\right)}{dr}=\frac{d}{dr}\left(\frac{16\pi}{a_0^3}r^2\cdot e^{-2r/a_0}\right)=\frac{16\pi}{a^3}\frac{d}{dr}\left(r^2\cdot e^{-2r/a_0}\right)=0$$

$$\frac{d}{dr}\left(r^2\cdot e^{-2r/a_0}\right)=0=r^2\left(-\frac{2}{a_0}e^{-2r/a_0}\right)+2re^{-2r/a_0}=0$$

$$-\frac{2}{a_0}r^2+2r=0 \qquad \Rightarrow \qquad r=a_0$$

نلاحظ أنّ الجواب الذي حصلنا عليه يتطابق مع نظرية بور، إلاّ أنّه يجب التنبّه إلى الفروق الجوهريّة بين النظريّتين، ففي حين يحدّد بور مسار الإلكترون فلا نجد الإلكترون إلاّ على ذلك المسار الدائري بنصف قطر مقداره a0، تقرّر ميكانيكا الكمّ أنّ الإلكترون موجود في كلّ مكانٍ حول النواة ولكن باحتمالات مختلفة بل ويمتدّ هذا الإلكترون من الناحية النظريّة إلى المالانهاية!!

ولكن، إذا كان الإلكترون يمتدّ إلى المالانهاية، فماذا نعني بمصطلح الفلك (orbital)؟ كيف نستطيع أنْ نُعَرِّفَ "الفلك" الذي يتواجد فيه ذلك الإلكترون؟ إذا كان الفلك هو المكان كلّه الذي يتواجد في الإلكترون

فإنّ حجم الفلك سيكون بالضرورة مالانهاية!! ولا شكّ إذاً أنّ جميع الأفلاك سيكون لها نفس الحجم وستكون مشتركةً مع بعضها في نفس الحيّز الذي يمثّله الفضاء اللامتناهي!!

للخروج من هذا المأزق ومن أجل "المحافظة" على التمايز بين الأفلاك اصطلح العلماء على أنْ يُعرّف الفلك بأنّه المكان الذي يكون احتمال تواجد الإلكترون فيه هو 90%، أو بعبارة أُخرى، هو المكان الذي يُقضّي فيه الإلكترون 90% من وقته. هذا يعني أنّ هنالك إحتمالاً مقداره 10% أنْ نجدَ الإلكترون خارج حدود الفلك الخاصّ به!

تدريب (2): احسب نصف قطر الفلك 1s في ذرّة الهيدروجين.

الدالّة الموجيّة التي تمثّل الفلك 1s هي:

$$\psi_{1s} = \frac{1}{\sqrt{\pi}}\left(\frac{Z}{a_0}\right)^{3/2} e^{-\frac{Zr}{a_0}}$$

(انظر ص81).

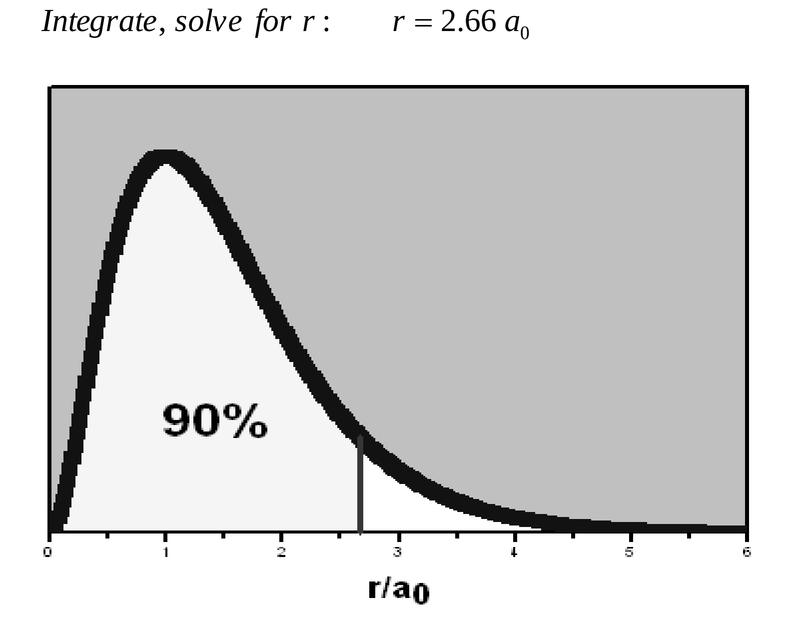
$$\psi_{1s} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{a_0^{3/2}} e^{-\frac{r}{a_0}}$$

$$P = \int_0^r \psi_{1s}^2 \, d\tau = 0.90 \qquad P = \int_0^r \psi_{1s}^2 \left(4\pi r^2 \, dr\right) = 0.90$$

$$P = \int_0^r \frac{1}{\pi a_0^3} e^{-\frac{2r}{a_0}} \left(4\pi r^2 \, dr\right) = 0.90$$

$$P = \frac{4}{a_0^3} \int_0^r r^2 e^{-\frac{2r}{a_0}} \, dr = 0.90$$

$$\textit{Integrate, solve for } r: \qquad r = 2.66 \, a_0$$



الدالة الكلّية :

حيث أنّ الدالة الكلية • هي حاصل ضرب الدالاّت الفرعية الثلاث • و • و R ، فإنّ أعداد الكمّ الثلاث n و l و m هي التي تحدّد قيمة الدالّة الكلية:

$$\psi_{nlm} = R_{nl}\ \Theta_{lm}\ \Phi_m$$

وسنحاول الآن تعلّم كيف نستنبط من الجداول السابقة الدالاّت الكلية لبعض حالات الإلكترون في ذرّة الهيدروجين.

تدريب (3): جِدِ الدالة الكلية لإلكترون في ذرّة الهيدروجين له الأعداد الكمّية التالية: .n=3, l=2, m=1

$$\psi_{321} = R_{32}\ \Theta_{21}\ \Phi_1$$

$$R_{32} = \frac{4}{9\sqrt{30}}\left(\frac{Z}{a_0}\right)^{3/2}\rho^2\ e^{-\rho/6} = \frac{4}{9\sqrt{30}}\left(\frac{Z}{a_0}\right)^{3/2}\left(\frac{2Zr}{a_0}\right)^2\ e^{-Zr/3a_0} = \frac{16}{9\sqrt{30}}\frac{r^2}{a_0^{7/2}}e^{-r/3a_0}$$

$$\Theta_{21} = \frac{\sqrt{15}}{2}\sin\theta\cdot\cos\theta \qquad\qquad \Phi_1 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{i\phi}$$

$$\psi_{321} = \frac{16}{9\sqrt{30}}\frac{r^2}{a_0^{7/2}}e^{-r/3a_0}\ \frac{\sqrt{15}}{2}\sin\theta\cdot\cos\theta\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{i\phi}$$

للتخلّص من العدد التخيّلي i والموجود في الدالّة •، نلجأ في العادة إلى عمل تراكيب خطّيّة مناسبة. ولهذا الغرض نلجأ إلى معادلة القيمة المميزة الخاصة بالدالة • (المعادلة 5.4) حيث نلاحظ أنّ القيمة المميزة هي m2–،

وعلى هذا فإنّ الدالات التي تختلف عن بعضها في إشارة m فقط لها نفس القيمة المميزة، إذ بعملية التربيع تختفي إشارة السالب. نضرب مثالاً على ذلك بالدالّتين •• و •••:

$$m=-1 \qquad\qquad m=1$$

$$\Phi_{-1}=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{-i\phi} \qquad\qquad \Phi_1=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{i\phi}$$

$$m^2=1 \qquad\qquad m^2=1$$

وحيث أنّ الدالّتين •• و ••• لهما نفس القيمة المميزة، فإنّ أيّة تركيبة خطّية من الدالتين سيكون لها نفس القيمة المميزة .

$$\Phi_x=\frac{1}{\sqrt{2}}(\Phi_1+\Phi_{-1})=\frac{1}{2\sqrt{\pi}}\left(e^{i\phi}+e^{-i\phi}\right)$$

$$=\frac{1}{2\sqrt{\pi}}[(\cos\phi+i\sin\phi+\cos(-\phi))+i\sin(-\phi)]=\frac{\cos\phi}{\sqrt{\pi}}$$

$$\Phi_y=\frac{1}{\sqrt{2}}(\Phi_1-\Phi_{-1})=\frac{i\sin\phi}{\sqrt{\pi}} \qquad \Rightarrow \qquad \frac{\sin\phi}{\sqrt{\pi}}$$

إذاً نستطيع بدلاً من الدالّتين •• و ••• أن نستخدم الدالّتين x• و y• بسبب عدم احتوائهما على العدد التخيّلي i. إذا عوّضنا مثلاً في المثال السابق x• بدلاً من 1•، فإنّنا نحصل على:

$$\psi_{32(1+-1)} = \frac{16}{9\sqrt{30}} \frac{r^2}{a_0^{7/2}} e^{-r/3a_0} \ \frac{\sqrt{15}}{2} \sin\theta \cdot \cos\theta \ \frac{\cos\phi}{\sqrt{\pi}}$$

(5.8).....

نلاحظ أنّنا بدلاً من m=1 أسفل رمز الدالة الكلّية كتبنا (1-+1) للدلالة على أنّنا استخدمنا تركيبة خطّية هي جمع الدالّتين •• و •••. من العلاقة بين نظام الإحداثيّات الديكارتي ونظام الإحداثيّات الكروي نجد أنّ:

$$x \propto \quad \sin\theta \cdot \cos\phi$$
$$z \propto \quad \cos\theta$$

وبربط هذه العلاقات مع الدالّة الكلّية (المعادلة 5.8) نستنبط أنّ الدالة الكلّية ممتدة في الفضاء باتجاه المحور x والمحور z. وبعبارة أكثر دقة فإنّ الدالة الكلية المذكورة تتعلّق بالفلك 3dxz.أمّا إذا قمنا بتعويض y• بدلاً من 1• فإنّنا نحصل على الفلك 3dyz (جرّب ذلك بنفسك).

تدريب (4): جِد الدالة الكلية لإلكترون في ذرّة الهيدروجين في الأفلاك 2px و 2py و 2pz.

نعرف من دراستنا للكيمياء أنّ الشكل العام للفلك الذي يتواجد فيه الإلكترون لا يعتمد على قيمة n، فالفلك 2px يشبه إلى حدّ كبير الفلك 3px، و1s يشبه 2s، وهلمّ جرّاً، وهذا الأمر مفهوم تماماً حيث أنّ عدد الكمّ n موجود فقط في معادلة الدالة القطريّة R وهذه تعطينا معلومات عن احتمال تواجد الإلكترون على الخط المنطلق من النواة إلى المالانهاية دون تخصيص اتجاه محدّد. أمّا تخصيص تواجد إلكترون في اتجاه محدّد في الفضاء فهو يعتمد على الزاويتين • و •. لنتأمّل مثلاً في الفلك 1s، حيث n=1 و l=0 و m=0. إنّ الدالة الكلّية لهذا الفلك هي:

$$\psi_{100} = \frac{1}{\sqrt{\pi}}\left(\frac{Z}{a_0}\right)^{3/2} e^{-\rho/2}$$

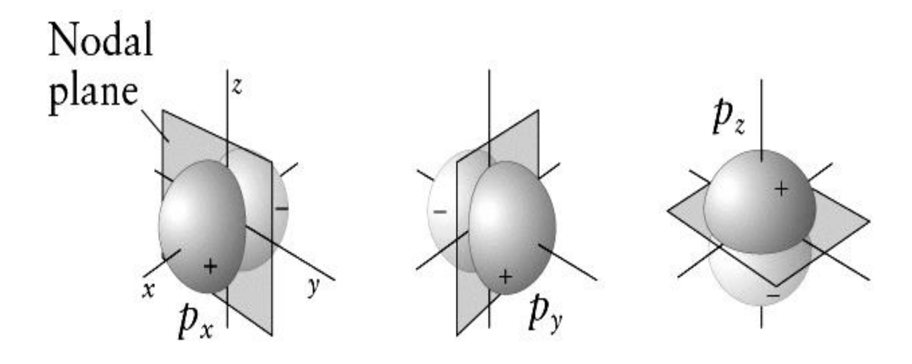
نُلاحظ أنّ الدالّة الكلية لا تعتمد على الزاويتين • و •، ممّا يعني أنّه لا يوجد اتجاه في الفضاء يُفضّلُ فيه تواجد الإلكترون عن اتّجاه آخر، ولهذا كان الفلك s كرويّاً فالكرة متماثلة في جميع الاتّجاهات (fully symmetric). أمّا بالنسبة للفلك pz فسنجد أنّ الدالة الفرعية •• تؤدّي إلى أن يكون الفلك ممتداً في اتّجاه المحور z (تدريب 4)، أي أن تواجد الإلكترون محتمل أكثر في هذا الاتّجاه من غيره من الاتّجاهات الأخرى. وفي حقيقة الأمر فإنّ الدالة الفرعية•••-كما ندرك من الجدول ص81- هي التي تحدّد شكل الفلك، أمّا الدالّة الفرعيّة • فهي التي تحدّد اتّجاهه في الفضاء. وقد ارتأى علماء الكمّ أن يجمعوا حاصل ضرب الدالّتين • و • تحت رمز Ylm،

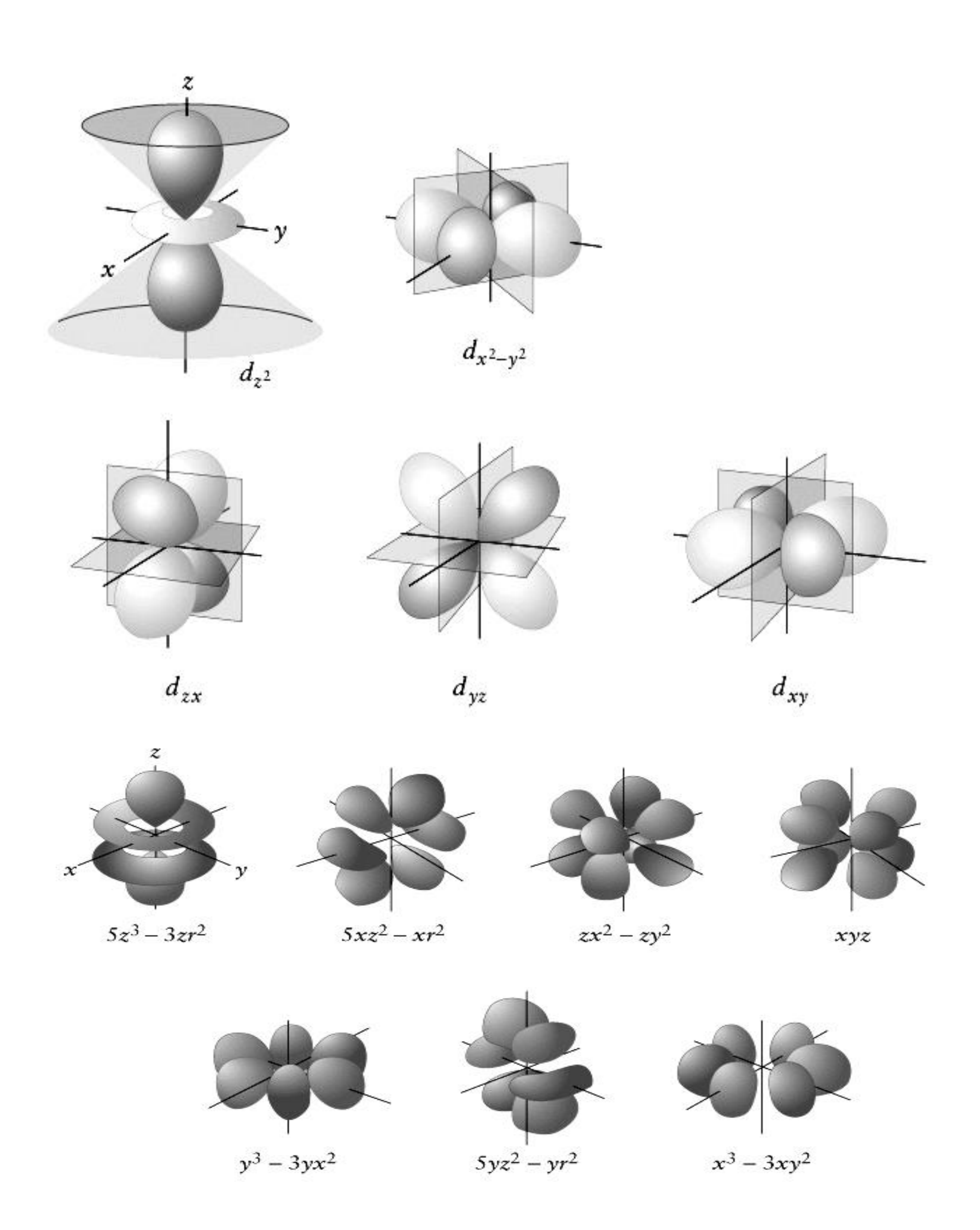
ويطلق على Y اسم الدالّة الزاويّة (angular function) كما تسمّى ايضاً بالمتوافقات الكرويّة (spherical harmonics) وهي نفس الحلول التي نحصل عليها عند حلّ معادلة شرودنجر لجسم يقوم بحركة دورانيّة حول نفسه:

$$\psi_{nlm} = R_{nl}\ \Theta_{lm}\ \Phi_{m}$$

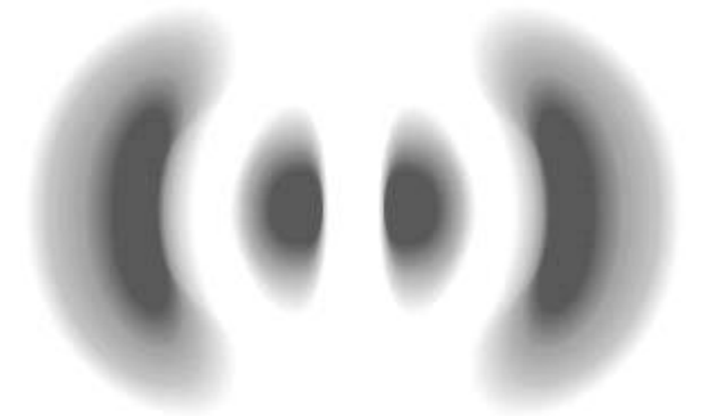
$$\psi_{nlm} = R_{nl}\ Y_{lm}$$

ماذا يحدث عندما نضرب الدالّة الزاويّة بالدالّة القطرية؟ حيث أنّ الدالّة القطرية يزداد امتدادها في الفضاء بزيادة قيمة n فإنّ الفلك الذي تمثّله الدالة الزاويّة يزداد حجماً عند ضرب الدالة الزاويّة بالدالّة القطرية، كما أنّه تزداد فيه العقد بزيادة n (انظر الرسم ص82). وعموماً نستطيع حساب عدد العُقَد في أيّ فلك بواسطة الصيغة: عدد العقد=(n-l-1).




z
y
x
d_{z^2}
$d_{x^2-y^2}$
d_{zx}
d_{yz}
d_{xy}
z
x
y
$5z^3 - 3zr^2$
$5xz^2 - xr^2$
$zx^2 - zy^2$
xyz
$y^3 - 3yx^2$
$5yz^2 - yr^2$
$x^3 - 3xy^2$

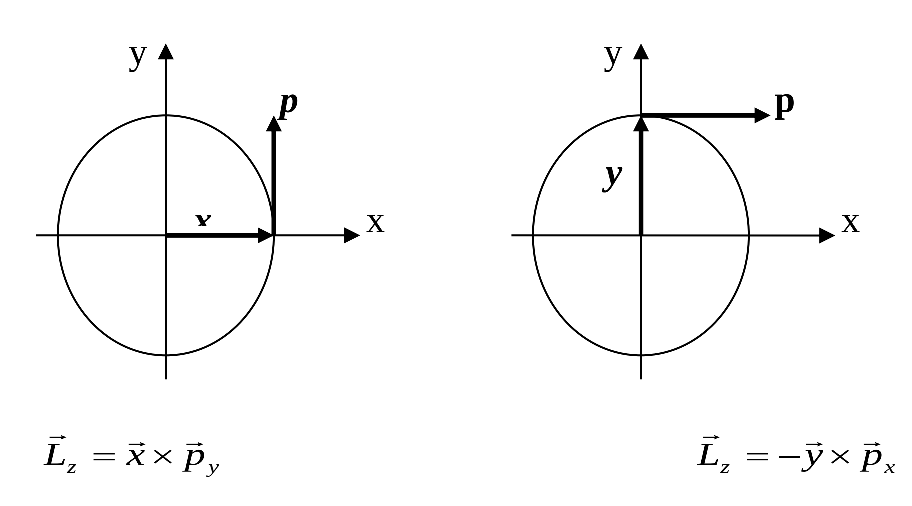
مقطع عرضي لتوزيع احتمالية إلكترون في الفلك 3p



العزم الزاويّ (angular momentum):

كنّا قد تعرّفنا في الفصل الأوّل على مفهوم العزم الزاويّ وقلنا إنّه قيمة متّجهة تنتج من عمليّة الضرب المتّجهي لنصف قطر دوران الجسم وعزمه الخطّي ($\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$). وحيث أنّ العزم الزاوي قيمة متجهة فإنّ له بالضرورة ثلاث مركّبات إحداها في البعد x ($\vec{L}_x$) والثانية في البعد y ($\vec{L}_y$) والأخيرة في البعد z ($\vec{L}_z$). وسنحاول فيما يلي تحديد قيمة كلٍّ من هذه المركّبات واستنباط مؤثّراتها.

لنتأمّل في دوران جسم موجود في المستوى x-y حول المحور z. هنالك إمكانيّتان للدوران: الأولى مع عقارب الساعة (يمين الرسم) والثانية عكس عقارب الساعة (يسار الرسم).

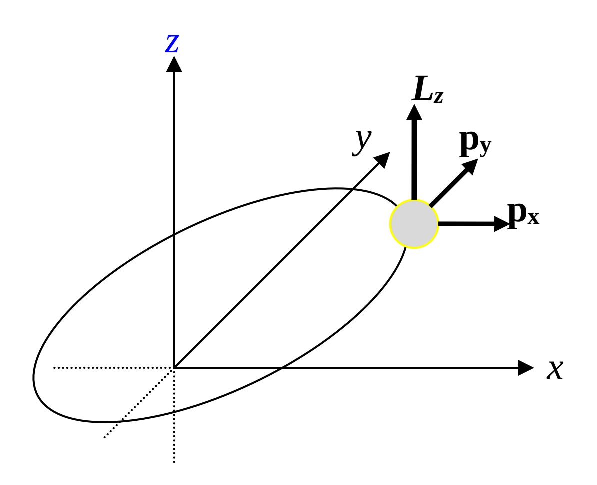


$\vec{L}_z = \vec{x} \times \vec{p}_y$ $\qquad\qquad$ $\vec{L}_z = -\vec{y} \times \vec{p}_x$

في كلتا الحالتين، فإنّ العزم الزاوي سيكون متّجهاً في البعد z، ويمكننا بذلك أنْ نسمّيَه $\vec{L}_z$. لاحظ أنّنا أدخلنا إشارة السالب في حالة الدوران مع عقارب الساعة لأنّ المتجه الناتج -وحسب قاعدة اليد اليمنى- سيكون تحت المستوى x-y في الجزء السالب من المحور z.

إذا أخذنا الآن بعين الاعتبار أيّة حركة دورانيّة في الفضاء ثلاثي الأبعاد حول نقطة الأصل، فإنّ مركبة العزم الزاويّ في البعد z تعتمد فقط على ذلك الجزء من الحركة الدورانيّة الموجود في المستوى x-y، والسبب في ذلك بسيط جدّاً فالضرب المتّجهي لـ z مع أي متّجه ($\vec{z} \times \vec{A}$) لا يمكن أن ينتج متّجهاً في البعد z.

وعلى هذا، فإنّ ذلك الجزء من الحركة الدورانيّة الموجود في البعد z لا يساهم في تحديد قيمة $\vec{L}_z$.



نستطيع الآن حساب المركبة z للعزم الزاوي $\vec{L}_z$، ومن ثَمّ تحديد المؤثّر الخاص بها:

$$L_z = x \cdot p_y - y \cdot p_x$$

$$\hat{L}_z = x \cdot \hat{p}_y - y \cdot \hat{p}_x = \frac{h}{2\pi i}\left(x \cdot \frac{\partial}{\partial y} - y \cdot \frac{\partial}{\partial x} \right)$$

$$x = r\sin\theta\cos\phi \qquad r = \sqrt{x^2+y^2+z^2}$$

$$y = r\sin\theta\sin\phi \qquad \theta = \cos^{-1}\left(\frac{z}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}}\right)$$

$$z = r\cos\theta \qquad \phi = \tan^{-1}\left(y/x\right)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} = \left(\frac{\partial r}{\partial x}\right)_{y,z}\frac{\partial}{\partial r} + \left(\frac{\partial \theta}{\partial x}\right)_{y,z}\frac{\partial}{\partial \theta} + \left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)_{y,z}\frac{\partial}{\partial \phi} = \sin\theta\cos\phi\frac{\partial}{\partial r} + \frac{\cos\theta\cos\phi}{r}\frac{\partial}{\partial \theta} - \frac{\sin\phi}{r\sin\theta}\frac{\partial}{\partial \phi}$$

$$\frac{\partial}{\partial y} = \left(\frac{\partial r}{\partial y}\right)_{x,z}\frac{\partial}{\partial r} + \left(\frac{\partial \theta}{\partial y}\right)_{x,z}\frac{\partial}{\partial \theta} + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y}\right)_{x,z}\frac{\partial}{\partial \phi} = \sin\theta\sin\phi\frac{\partial}{\partial r} + \frac{\cos\theta\sin\phi}{r}\frac{\partial}{\partial \theta} + \frac{\cos\phi}{r\sin\theta}\frac{\partial}{\partial \phi}$$

$$\frac{\partial}{\partial z} = \left(\frac{\partial r}{\partial z}\right)_{y,x}\frac{\partial}{\partial r} + \left(\frac{\partial \theta}{\partial z}\right)_{y,x}\frac{\partial}{\partial \theta} + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z}\right)_{y,x}\frac{\partial}{\partial \phi} = \cos\theta\frac{\partial}{\partial r} - \frac{\sin\theta}{r}\frac{\partial}{\partial \theta}$$

وبالتعويض نحصل على:

$$\hat{L}_z = \frac{h}{2\pi i}\frac{\partial}{\partial \phi}$$

وبنفس الطريقة:

$$L_x = y\cdot p_z - z\cdot p_y$$

$$\hat{L}_x = y\cdot \hat{p}_z - z\cdot \hat{p}_y$$

$$\hat{L}_x = \frac{h}{2\pi i}\left(y\cdot\frac{\partial}{\partial z} - z\cdot\frac{\partial}{\partial y}\right)$$

$$L_y = z\cdot p_x - x\cdot p_z$$

$$\hat{L}_y = z\cdot \hat{p}_x - x\cdot \hat{p}_z$$

$$\hat{L}_y = \frac{h}{2\pi i}\left(z\cdot\frac{\partial}{\partial x} - x\cdot\frac{\partial}{\partial z}\right)$$

$$\hat{L}_x = \frac{h}{2\pi i}\left(-\sin\phi\frac{\partial}{\partial \theta} - \cot\theta\cdot\cos\phi\frac{\partial}{\partial \phi}\right)$$

$$\hat{L}_y = \frac{h}{2\pi i}\left(\cos\phi\frac{\partial}{\partial \theta} - \cot\theta\cdot\sin\phi\frac{\partial}{\partial \phi}\right)$$

وحيث أنّ:

$$\left|\vec{L}\right|^2 = \left|\vec{L}_x\right|^2 + \left|\vec{L}_y\right|^2 + \left|\vec{L}_z\right|^2$$

$$\hat{L}^2 = \hat{L}_x^2 + \hat{L}_y^2 + \hat{L}_z^2$$

$$\hat{L}^2 = -\frac{h^2}{4\pi^2}\left[\frac{1}{\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial}{\partial\theta}\right) + \frac{1}{\sin^2\theta}\frac{\partial^2}{\partial\phi^2}\right]$$

وهكذا حصلنا على مؤثّرات المركّبات الثلاث للعزم الزاوي ($\vec{L}_z$ ، $\vec{L}_y$ ، $\vec{L}_x$) وكذلك المؤثّر الخاص بمربّع العزم الزاوي (L2).

نستطيع الآن أن نحسب مركّبة العزم الزاوي في الاتجاه z ($\vec{L}_z$) للإلكترون في ذرّة الهيدروجين:

..........(5.9)

$$\hat{L}_z\psi = L_z\psi \qquad \frac{h}{2\pi i}\frac{\partial}{\partial\phi}\psi = L_z\psi \qquad \frac{h}{2\pi i}\frac{\partial}{\partial\phi}R\Theta\Phi = L_z R\Theta\Phi$$

$$R\Theta\frac{h}{2\pi i}\frac{\partial\Phi(\phi)}{\partial\phi} = R\Theta L_z\Phi \qquad \frac{h}{2\pi i}\frac{\partial}{\partial\phi}\Phi(\phi) = L_z\Phi$$

$$\Phi = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{im\phi}$$

$$\hat{L}_z\Phi = \frac{h}{2\pi i}\frac{\partial\Phi(\phi)}{\partial\phi} = \frac{imh}{2\pi i}\cdot\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{im\phi} = \frac{mh}{2\pi}\Phi$$

$$L_z = m_l \frac{h}{2\pi} \quad (5.10)$$

تبيّن المعادلة الأخيرة (5.10) أنّ عدد الكمّ m هو الذي يحدّد مقدار مركّبة العزم الزاوي في الاتجاه z ($\vec{L}_z$) للإلكترون في ذرّة الهيدروجين ($\vec{L}_z$ مكمّاة)، وهو كما سنرى يحدّد اتّجاه العزم الزاوي L في الفضاء. يُلاحظ أنّنا أدخلنا الرمز l قرب m لتمييزها عن m أخرى سيأتي الحديث عنها لاحقاً.

نحسب الآن العزم الزاوي L للإلكترون في ذرّة الهيدروجين:

$$\hat{L}^2 \psi = L^2 \psi$$

$$\hat{L}^2 \psi = -\frac{h^2}{4\pi^2}\left[\frac{1}{\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial}{\partial\theta}\right)+\frac{1}{\sin^2\theta}\frac{\partial^2}{\partial\phi^2}\right]\psi$$

$$\hat{L}^2 \psi = -\frac{h^2}{4\pi^2}\left[\frac{1}{\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial}{\partial\theta}\right)+\frac{1}{\sin^2\theta}\frac{\partial^2}{\partial\phi^2}\right]R\Theta\Phi$$

$$\hat{L}^2 \psi = -\frac{h^2 R(r)}{4\pi^2}\left[\frac{\Phi(\phi)}{\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial\Theta(\theta)}{\partial\theta}\right)+\frac{\Theta(\theta)}{\sin^2\theta}\frac{\partial^2\Phi(\phi)}{\partial\phi^2}\right] = L^2\psi = L^2 R\Theta\Phi$$

(5.11)...

وبقسمة طرفي المعادلة الأخيرة على R••:

$$-\frac{h^2}{4\pi^2}\left[\frac{1}{\Theta(\theta)\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial\Theta(\theta)}{\partial\theta}\right)+\frac{1}{\sin^2\theta}\cdot\frac{1}{\Phi(\phi)}\frac{\partial^2\Phi(\phi)}{\partial\phi^2}\right]=L^2$$

$$-\frac{h^2}{4\pi^2}\left[\frac{1}{\Theta(\theta)\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial\Theta(\theta)}{\partial\theta}\right)+\frac{-m^2}{\sin^2\theta}\right]=L^2$$

$$\frac{h^2}{4\pi^2}\left[\frac{m^2}{\sin^2\theta}-\frac{1}{\Theta(\theta)\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial\Theta(\theta)}{\partial\theta}\right)\right]=L^2$$

إذا تأمّلنا قليلاً في ما هو موجود بين القوسين المربّعين أدركنا أنّه نفس الطرف الأيسر في معادلة ثيتا (5.6). بالاستفادة من معادلة ثيتا نحصل على

$$\frac{h^2}{4\pi^2}[l(l+1)]=L^2$$

$$L=\sqrt{l(l+1)}\cdot\frac{h}{2\pi} \quad (5.12).....$$

تبيّن المعادلة الأخيرة أنّ العزم الزاويّ هو قيمة فيزيائية مكمّاة يحدّدها عدد الكمّ •. وتختلف المعادلة الأخيرة عن مسلّمة بور المتعلّقة بالعزم الزاويّ من وَجهين: الأول أنّ عدد الكمّ l يسمح له بأن يأخذ القيمة 0، ويكون عندها العزم الزاوي L أيضاً صفراً في حين أنّ أقل قيمة للعزم الزاوي حسب بور هي عندما تكون n=1 ولا يمكن بذلك أن يكون العزم الزاوي حسب بور مساوياً لصفر. أمّا الوجه الثاني للاختلاف هو أنّ ثابت التناسب بين L و h/2• هو $a=\sqrt{a^2}$ في نظرية بور و $\sqrt{a^2+a}$

في نظرية الكم. تجدر الملاحظة أنّ ما نحصل عليه في المعادلة الأخيرة هو القيمة المطلقة للعزم الزاويّ (طول المتجه)، وهي بذلك لا تعطينا أيّة معلومة فيما يخص اتّجاه العزم الزاوي في الفضاء. إلاّ أنّنا نستطيع معرفة الاتّجاه من قيمة المركّبة في البعد z كما سنوضّح بعد قليل، ولكن قبل ذلك لا بدّ لنا من مراجعة بعض ما يتعلّق بالمؤثّرات.

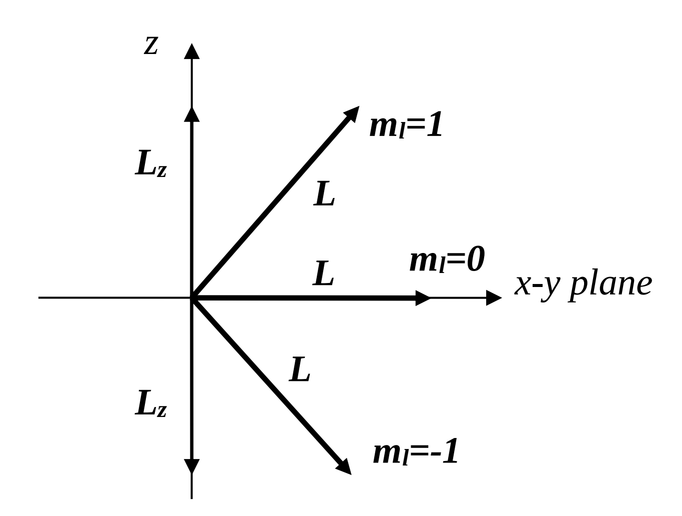
تشير حساباتنا السابقة أنّ الدالّة الموجية • هي دالّة مميّزة للمؤثّر $\hat{L}_z$ (المعادلة 5.9) كما أنّها دالّة مميزة للمؤثّر $\hat{L}^2$ (المعادلة 5.11)، ففي كلا الحالين كانت الدالّة الموجية حلاّ لمعادلة القيمة المميزة لكلا المؤثرين. هذا يعني أنّ المؤثّرين $\hat{L}_z$ و $\hat{L}^2$ تبادليّان وبذلك يمكننا تحديد العزم الزاوي (L2) ومركّبة العزم الزاوي في البعد z (Lz) في نفس الوقت بدقّة. ولكن هل نستطيع في نفس الوقت تحديد المركّبة (Lx) بدقة؟ إذا كان الجواب بالإيجاب فيجب أن تكون الدالّة الموجية كذلك حلاّ لمعادلة القيمة المميزة للمؤثّر الخاص بهذا المؤثّر.

$$\hat{L}_x \psi \neq ? = const \cdot \psi$$

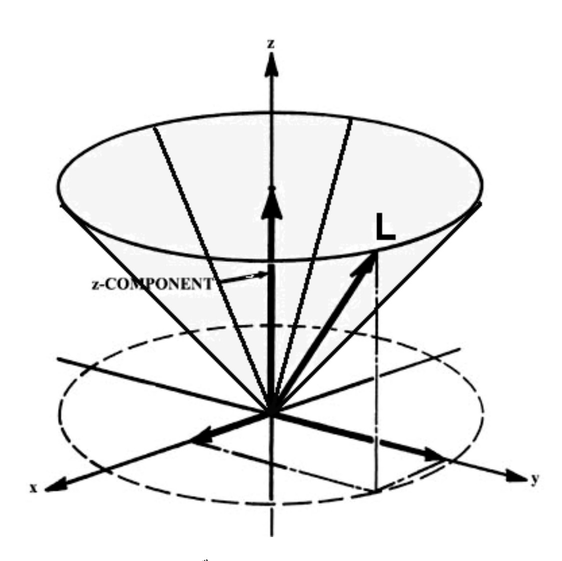
عند تشغيل المؤثّر $\hat{L}_x$ على الدالّة الكليّة فإنّنا لا نحصل على ثابت مضروب بالدالّة الكلية نفسها (جرّب ذلك بنفسك)، وعلى هذا فإنّ الدالة الكلية • ليست قيمة مميزة لمؤثّر المركبة Lx، وعليه لا يمكننا تحديد Lx و Lz في نفس الوقت بدقة، أو تحديد Lx و L2 في نفس الوقت بدقّة. نفس الشيء ينطبق على المركّبة Ly.

نستنبط ممّا سبق أنّه إذا قمنا بتحديد L2 و Lz فإنّ قيم Lx و Ly تكون غير محدّدة (indeterminate)، وهذا أمر بالغ الأهمّية في النقاش التالي الخاص باتجاه العزم الزاوي L في الفضاء.

نحسب الآن العزم الزاوي واتجاهه في الفضاء للأفلاك المختلفة ونبدأ بالفلك s، فحيث أنّ l=0 وبالتالي ml=0 فإنّ L2=0 و Lz=0. أمّا بالنسبة للفلك p فإنّ l=1، وعليه يكون العزم الزاوي للإلكترون الموجود في الفلك p هو $\sqrt{1(1+1)}\, h/2\pi = \sqrt{2}\, h/2\pi$. ولكن هناك ثلاث قيم ml للإلكترون في الفلك p (ml=-1, 0,1) ممّا يعني وجود ثلاث قيم مختلفة لمركّبة العزم الزاوي في الاتجاه z حسب ما تقتضيه المعادلة (5.10). ويلخّص الرسم التالي هذه النتائج:



نلاحظ أنّ متّجهات العزم الزاويّ في الرسم أعلاه لها كلّها نفس الطول، غير أنّ هناك ثلاثَ إمكانات مختلفة لها من حيث الزاوية التي تصنعها هذه المتّجهات مع المستوى x-y. يجب أن نتنبّه عند هذه النقطة أنّ المركبتيّن Ly وLx يكونان غير محدّدتين إطلاقاً ويمكن بذلك أن يأخذا أيّة قيمة، وبهذا يكون مسموحاً لكل واحد من متّجهات العزم الثلاث أن يدور حول المحور z كما يشاء فذلك لا يغيّر من طول المتّجه ولا من قيمة المركّبة Lz.



تدريب (5): حدّد قيم العزم الزاويّ واتّجاهاته الممكنة في الفضاء لإلكترون في الفلك d (مع الرسم).

تدريب (6): لخّص معاني أعداد الكمّ n و l و ml. لماذا يسمّى n بعدد الكمّ الرئيس (principal quantum number) وl بعدد كم العزم الزاويّ (angular moment quantum number)؟

العزم المغناطيسي (magnetic moment):

عندما تتحرّك الشحنات فإنّها تنتج مجالاً مغناطيسيّاً؛ يدلّ على ذلك أنّه عندما يسري تيّار كهربائي في سلك ما يتكوّن حقل مغناطيسي حول السلك يمكن رصده بنثر برادة حديد مثلاً حولَ السلك،

وهل التيّار الكهربائي سوى سيلٍ جارٍ من الإلكترونات؟! يُعرّف العزم المغناطيسي • بأنّه حاصل ضرب التيار الكهربائي والمساحة المحصورة بالسلك الذي يسري فيه التيّار الكهربائي:

$$\mu = I \cdot A$$

يُتوقّع ممّا سبق أنْ ينتج الإلكترون في دورانه حول النواة مجالاً مغناطيسيّاً وأن يكون له عزم مغناطيسي يمكن تقديره باستخدام المعادلة الأخيرة التي تمّ بواسطتها تعريف العزم المغناطيسي، ولكن يجب أوّلاً أن نحدّد مقدار التيّار الكهربائي الذي تُمثّله حركة الإلكترون حول النواة.



إذا كانت سرعة الإلكترون هي v، فإنّ المسافة التي يقطعها الإلكترون على شكل لفّات ستكون x=v.t. وإذا كانت المسافة التي تمثّلها اللفّة الواحدة هي 2•r، فإنّ عدد اللفّات التي يقطعها الإلكترون سيكون v t/2•r، ويكون بذلك عدد اللفّات في الثانية الواحدة هو v/2•r. في كلّ لفّة تسري حول النواة شحنة مقدارها شحنة الإلكترون (e-) ممّا يعني أن مقدار الشحنة التي تسري حول النواة في الثانية الواحدة هي ev/2•r–.

ولكن إذا كان التيّار الكهربائي يُعرّف بأنّه الشحنة التي تسري في وحدة الزمن (I=Q/t)، فإنّ التيّار الكهربائي I هو $-ev/2\pi r$. وعلى هذا فإنّ العزم المغناطيسي لهذا الإلكترون هو :

$$\mu = I \cdot A = -\frac{ev}{2\pi r} \cdot \pi r^2 = -\frac{evr}{2}$$

نعطي هذا العزم المغناطيسي الرمز l• للدلالة على أنّه يتعلّق بحركة الإلكترون حول النواة أو ما يسمّى بالحركة المداريّة (orbital motion) لنميّزه عن العزم المغناطيسي الناتج من حركة الإلكترون حول نفسه كما سيأتي.

نعرّف الآن ما يسمّى بالنسبة المغنط-حركيّة (magnetogyric ratio) وهي نسبة العزم المغناطيسي المداريّ إلى العزم الزاويّ، وهي كما هو واضح نسبة ثابتة لا تعتمد إلاّ على كتلة الإلكترون وشحنته:

$$\gamma = \frac{\mu_l}{L} = -\frac{evr}{2} \div m_e vr = -\frac{e}{2m_e} \qquad (5.13)$$

وتشير المعادلة الأخيرة إلى أنّ العزم المغناطيسي يتناسب تناسباً طرديّاً مع العزم الزاويّ إلاّ أنّه معاكس له في الاتّجاه كما يتّضح من إشارة السالب في المعادلة. يمكننا الآن بواسطة النسبة المغنط-حركيّة والمعادلة (5.10) استنباط معادلة تربط بين المركّبة في الاتّجاهz للعزم المغناطيسي وعدد الكمّ ml:

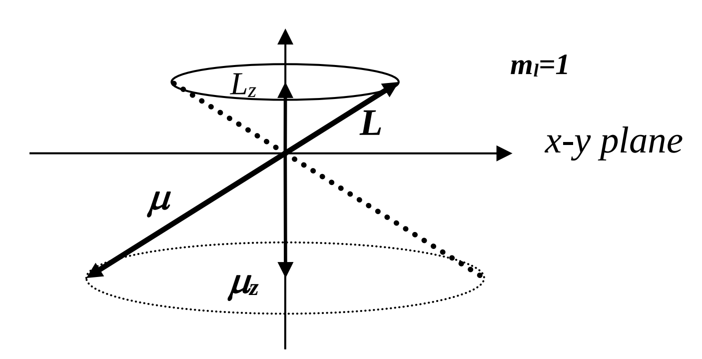
$$\mu_{L,z} = \gamma \cdot L_z = -\frac{e}{2m_e}\left(m_l \frac{h}{2\pi}\right) = -m_l \cdot \frac{eh}{4\pi m_e}$$

$$\mu_B = \frac{eh}{4\pi m_e} = 9.274 \times 10^{-24} Am^2$$

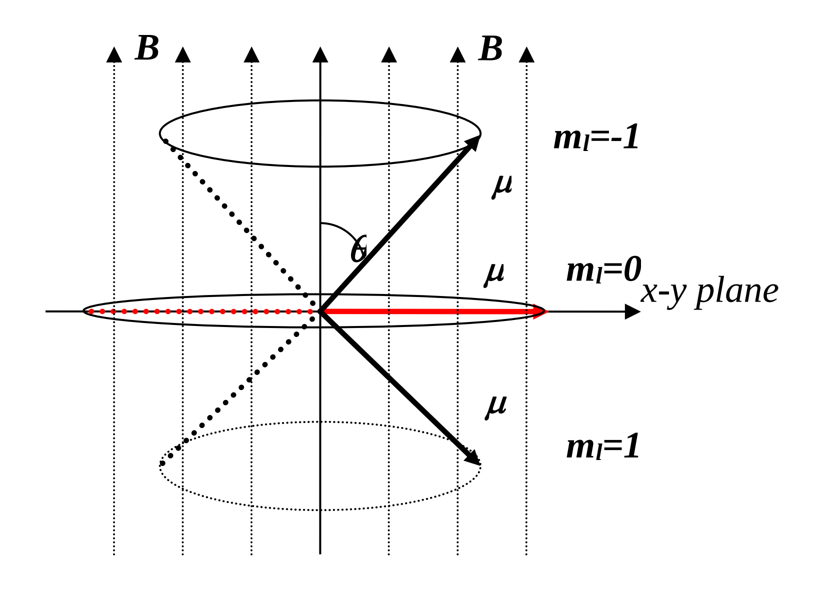
$$\mu_{L,z} = -m_l \cdot \mu_B$$

في حقيقة الأمر يمكننا الاستغناء عن إشارة السالب في المعادلة الأخيرة لأنّ ml تأخذ أصلاً نفس القيم بالسالب والموجب ولكنّنا آثرنا الإبقاء عليها للتأكيد على أنّ العزم المغناطيسي يعاكس في اتّجاهه العزم الزاويّ، أمّا الثابت B• فيسمّى بمغناطون بور (Bohr's magneton). وتبيّن المعادلة الأخيرة أنّ العزم المغناطيسي المداري هو قيمة مكمّاة وله اتّجاهات محدّدة في الفضاء.

نستطيع بواسطة المعادلة(5.13)أن نستنبط المؤثّرات الخاصة بمربّع العزم المغناطيسي ومركّباته في الاتّجاهات x وy وz ($\hat{M}_x, \hat{M}_y, \hat{M}_z, \hat{M}^2$)، كما نستطيع أن نبرهن أن المؤثّرين $\hat{M}_z, \hat{M}^2$ تبادليّان ممّا يعني أنّه يمكننا تحديد مربّع العزم المغناطيسي μ_l^2 و المركّبة في الاتّجاه z، $\mu_{l,z}$، في نفس الوقت بدقّة، أمّا المركّبتان في الاتّجاه x و y($\hat{M}_x, \hat{M}_y$) فسيكونان غير محدّدتين. ويلخّص الرسم التالي هذه الحقائق.



ماذا يحدث إذا قمنا بوضع مجال مغناطيسي خارجي وجعلناه يؤثّر على إلكترون ذرّة الهيدروجين؟ لنكونَ أكثر تحديداً نأخذ بعين الاعتبار إلكتروناً في الفلك p:



نرى في الرسم أعلاه أنّ هناك ثلاث إمكانات أساسيّة للعزم المغناطيسي المداري لإلكترون الفلك p في الفضاء. بوجودحقل مغناطيسي خارجي قوّته B (قوّة الحقل المغناطيسي قيمة متّجهة ولتكن في الاتّجاه z) يتأثر كلّ واحد من هذه العزوم المغناطيسية بطريقة مختلفة، ذلك أنّ طاقة التأثير (Emagnetic) بين قوّة الحقل المغناطيسي الخارجي($\vec{B}$) والعزم المغناطيسي تعتمد على الزاوية بين المتّجهين:

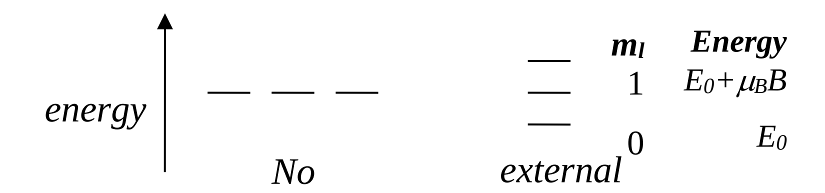
$$E_{mag} = -\vec{\mu} \bullet \vec{B}$$

$$E_{mag} = -\vec{\mu} \bullet \vec{B} = -\mu B \cos\theta = -\mu \cos\theta \, B = -\mu_z B = +m_l \, \mu_B \, B$$

يؤدّي التأثير المتبادل بين الحقل المغناطيسي الخارجي والعزم المغناطيسي إلى تغيير في طاقة إلكترون الفلك p، وترتفع (لا تعود موجودة) بذلك حالة التفسّخ (degeneracy) لأنّ الطاقة الجديدة هي طاقة الفلك p في غياب المجال المغناطيسي الخارجي (E0) مجموعاً لها طاقة التأثير المتبادل بين الحقل المغناطيسي الخارجي والعزم المغناطيسي المداريّ للإلكترون:

$$E = E_0 + E_{magnetic}$$

$$E = E_0 + m_l \, \mu_B \, B$$



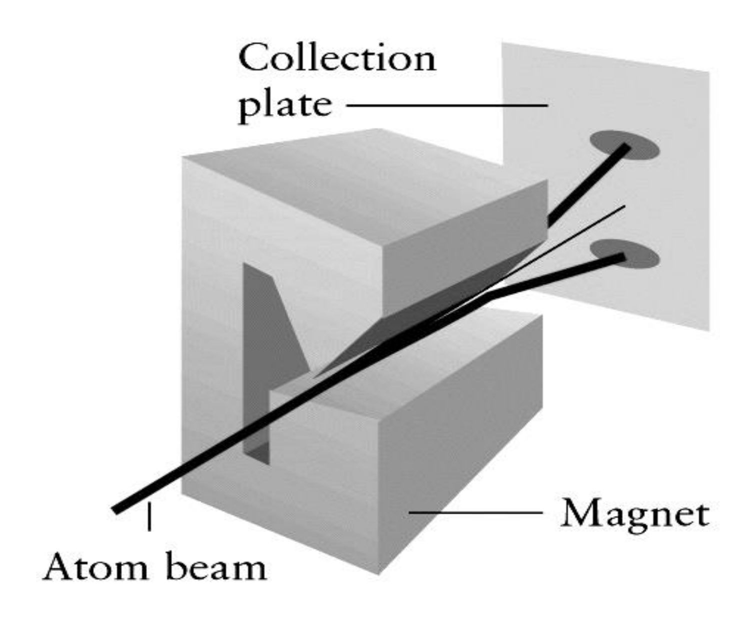
بنفس الآليّة، تُستخدم الحقول المغناطيسية الخارجية لرفع حالات التفسّخ في العديد من التقنيّات التحليليّة في الكيمياء مثل الرنين المغناطيسي النووي (nuclear magnetic resonance, NMR) و رنين حركة الإلكترون المغزلية (electron spin resonance, ESR)، وكذلك في تقنية التصوير بالرنين المغناطيسي (magnetic resonance imaging, MRI).

الحركة المغزليّة[1] (spin motion)

في العام 1921 قام العالمان شتيرن (Stern) وجيرلاخ (Gerlach) بإجراء تجربتهما الشهيرة والتي تتضمّن تمرير حزمة من ذرّات الفضة خلال مجال مغناطيسي، وقد لاحظ العالمان أنّ الحزمة عند خروجها من المجال المغناطيسي تكون قد انقسمت إلى حزمتين، واحدة نحو الأعلى والأخرى نحو الأسفل. في العام 1925، قدّم طالبا الدراسات العليا الهولنديّان جودسميت (Goudsmit)

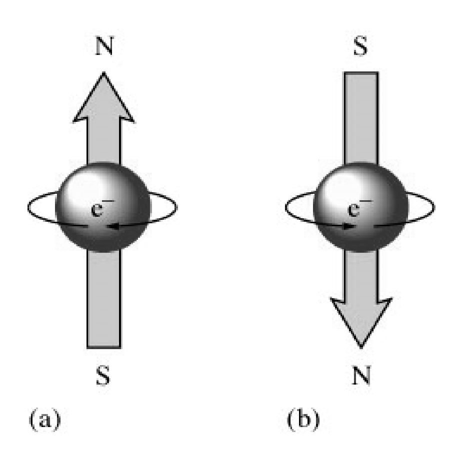
1 الحركة المغزليّة هي دوران الشيء حول نفسه وسمّيت بذلك لأنّها نفس حركة المِغزل الذي يستخدم لصنع خيوط القطن والصوف.

وأولنبك (Uhlenbeck) تفسيراً مقنعاً لهذا الانقسام يعتمد على فكرة أنّ الإلكترون يدور حول نفسه وأنّه يمتلك بذلك عزماً زاويّاً مغزليّاً (spin angular moment)، كما نجحت هذه الفكرة في تفسير أنّ ما يبدو كخط وحيد في الطيف الذريّ كان في حقيقة الأمر يتكوّن من عدّة خطوط قريبة جدّاً إلى بعضها (fine structure). إلاّ أنّه كان هناك بعض المشاكل الأساسيّة المرتبطة بهذه الفكرة.



في العام 1929 قام كلّ من باولي (Pauli) وديراك (Dirac) بتطوير ميكانيكا الأمواج نظريّاً وذلك بإدخال النظرية النسبيّة فيها، وقد أثبتت الصورة الجديدة لميكانيكا الأمواج أنّ العزم الزاويّ للحركة المغزلية للإلكترون مكمّىَ

ولا يأخذ إلاّ قيمتين فقط، ممّا يعني أنّ الإلكترون يدور حول نفسه في اتّجاهين فقط من بين كلّ الاتّجاهات المحتملة، وأنّ هذين الاتّجاهين متعاكسان.



إلاّ أنّه يجب التنبّه إلى أنّ هذه الصفة (أي العزم الزاويّ المغزلي) لا يمكن استنباط مؤثّرها وبالتالي استنباطها من قوانين الفيزياء التقليديّة، وقيمتها حسب قوانين ميكانيكا الكمّ لا تمتّ بصلة لا من قريب أو من بعيد بقوانين الفيزياء التقليدية، ولهذا يُطلقُ على هذه الصفة وصف أنّها صفة لا مثيل لها في عالم الفيزياء التقليدية.

كيف يمكننا إذاً حساب هذه الصفة وتحديد قيمها؟ يتمّ فرض مؤثّر للعزم الزاوي للحركة المغزلّية يتوافق مع النتائج الأخرى و"يُسلّم" بصحّته! ويمكن تلخيص النتائج على النحو التالي:

$$\left|\vec{S}\right| = \sqrt{s(s+1)} \cdot \frac{h}{2\pi} \qquad \vec{S}_z = m_s \cdot \frac{h}{2\pi}$$

$$s = +\frac{1}{2} \qquad m_s = \pm\frac{1}{2}$$

حيث أنّ S هو العزم الزاوي المغزلي و s هو عدد كم العزم الزاوي المغزلي، أمّا Sz فهي مركبة العزم المغزلي في الاتّجاه z، وتسمّى ms بعدد الكم المغناطيسي المغزليّ. يلاحظ أنّه يُطلق على عدد كم العزم الزاويّ المغزليّ مصطلح spin وكذلك على ms.

وحيث أنّ الإلكترون هو شحنة، فإنّه يمتلك بالضرورة عند دورانه حول نفسه عزماً مغناطيسياً ونسمّيه العزم المغناطيسيّ المغزليّ (spin magnetic moment) ويُعطى الرمز s• ويكون معاكساً للعزم الزاويّ للحركة المغزليّة في الاتّجاه:

$$\mu_s \propto S$$

$$\textit{for electrons} \quad \mu_s = g_e \gamma S$$

$$g_e = 2.0023193314 \quad (\textit{electronic} \quad g - \textit{factor})$$

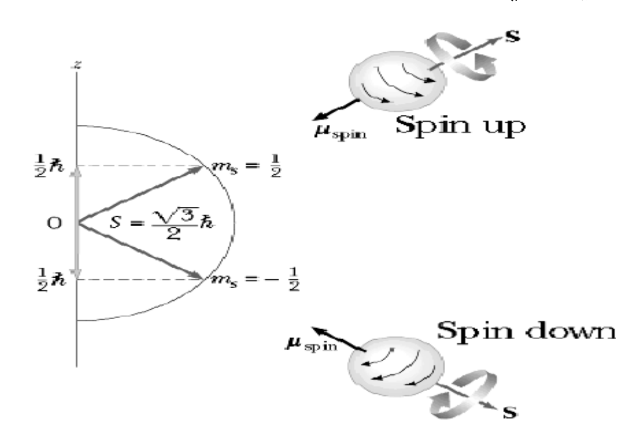
$$\mu_{s,z} = g_e \gamma S_z$$

$$\mu_{s,z} = 2 \times \left(\frac{-e}{2m_e}\right) \times \left(m_s \cdot \frac{h}{2\pi}\right)$$

$$\mu_{s,z} = \pm\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{-eh}{2\pi m_e}\right) = \mp\frac{eh}{4\pi m_e} = \pm\mu_B$$

يمكننا الآن تفسير نتائج تجربة شتيرن وجيرلاخ، فالإلكترونات بدورانها حول نفسها تعتبر مغناطيسات صغيرة ويكون اتّجاه أقطاب هذه المغناطيسات متعاكساً عندما يكون عزمها المغناطيسي متعاكساً (الرسم ص98)، ولهذا يتجاذب بعض هذه الإلكترونات مع المجال المغناطيسي الخارجي ويتنافر البعض الآخر مكوّنين بذلك حزمتين من الذرّات. لاحظ أنّنا أخذنا فقط بعين الاعتبار الإلكترون الأخير في ذرّة الفضة الموجود في الفلك 5s، فبقيّة الإلكترونات ليست لها أهمّية في هذا الخصوص(لا مجال هنا لتفسير هذه الحقيقة)، كما نلاحظ أن وجود الإلكترون في الفلك s يجعل من عزمه المغناطيسي المداري (l•) صفراً ممّا يعني انعدام التأثير المتبادل بين العزم المغناطيسي المداريّ والحقل المغناطيسي الخارجي.

تدريب (7): ما هو تأثير الحقل المغناطيسي الخارجي على إلكترونات الفلك 1s في ذرّة الهيدروجين؟



أخيراً، بقي علينا أن نأخذ الحركة المغزليّة رياضيّاً بعين الاعتبار. نتذكّر أن الدالة الكليّة الخاصّة بإلكترون ذرّة الهيدروجين (ص 75، ص 84) لا تعتمد إلاّ على موقع ذلك الإلكترون في الفضاء (الإحداثيّات x,y,z أو r,•••) وأعداد الكمّ n,l,ml، وهي تهمل بالتالي حركته المغزليّة. نقوم بتطوير الدالّة الكليّة وذلك بضربها بدالّة تمثّل الحركة المغزليّة:

$$\psi_{total} = \psi_{space} \cdot \psi_{spin}$$
$$\psi_{space} = \psi(x, y, z) = \psi_{n\,l\,m_l}$$
$$\psi_{spin} = \alpha \quad or \quad \beta \qquad\qquad \alpha : spin\ up \quad \uparrow$$
$$\beta : spin\ down \quad \downarrow$$

حيث أنّ space• هي الدالّة التي تمثّل تواجد الإلكترون في الفضاء (space) حول النواة، أمّا الدالّة spin• فهي التي تصف الحركة المغزليّة (spin) للإلكترون. وبما أنّ الحركة المغزليّة لا تكون إلاّ في اتجاهين اثنين متعاكسين فقد جرت العادة على أن يسمّى أحد هذين الاتّجاهين "نحو الأعلى" (up) والثاني "نحو الأسفل" (down) ويرمز لهما بسهمين متعاكسين ويرمز لـspin•• التي تمثّل الاتّجاه الأوّل • والتي تمثّل الاتّجاه الثاني •.

الفصل الخامس عشر

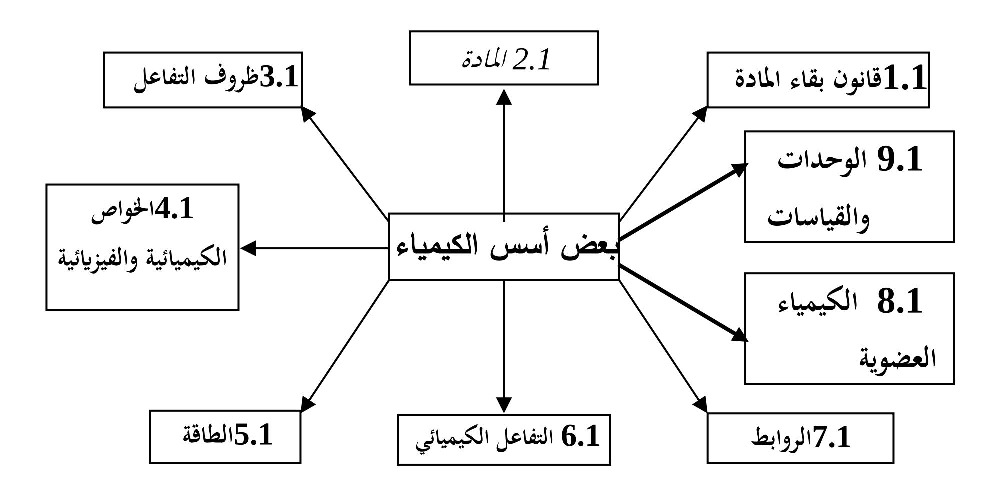
بعض المبادئ الأساسية للكيمياء الحيوية

يهدف على تدريب الدارس على المبادئ الأساسية التي تهم كل دارس لأي فرع من فروع العلوم والممثلة في الكيمياء – الفيزياء – الأحياء – الجيولوجيا (علوم الأرض) – علوم البحار – الفلك ......الخ. وتعتبر هذه المبادئ عبارة عن العديد من المعلومات التي تختص بعدة فروع من فروع العلوم التكاملية التي ذكرت فروعها أعلاه. فيفضل أن يكون الدارس على دراية جيدة لهذه المبادئ وهي بصورة مختصرة تتركز في التالي: الأرقام المعنوية – نسبة الخطأ (الاختلاف - التصحيح....الخ) - النظام الدولي لوحدات كل من التيار الكهربائي - درجة الحرارة - كمية المادة - شدة الإضاءة - – الكثافة – الضغط.....الخ . وبعض الوحدات مثل اللتر – سم3– كجم – أمبير – آرج – سعر حراري لكل مول –النانوميتر.

ومن منظومة محتوي مقرر أسس الكيمياء العامة يتضح أن ما سيتم تدريسه في هذا الباب ما هو إلا معلومات علمية تدخل ضمن جميع أبواب هذا الكتاب. وأمثلة عليها هي:

دراسة الضغط والحجم ووحداتهما مثلا سيتم التعرض إليها بتوسع في الباب الخامس الخاص بدراسة الغازات. والحسابات الكيميائية مثل حساب المول والكاشف المحدد للتفاعل (المتفاعل المحدد) سيدرس بالباب الثاني ، وتدخل بشكل جوهري الحسابات الكيميائية بالباب الخامس والسادس والسابع والخاص بالغازات والاتزان الكيميائي والأيوني للتفاعلات العكوس بالترتيب.

الوحدات تستخدم حسب طبيعة القانون الرياضي وهي تدخل ضمن الحسابات الرياضية في أغلب أبواب المقرر مثل حساب طول الرابطة الكيميائية والوحدة المناسبة للاستعمال والمول وثابت الاتزان وغيرها. والمنظومة التالية تعطي فكرة عن طبيعة مبادئ علم الكيمياء.

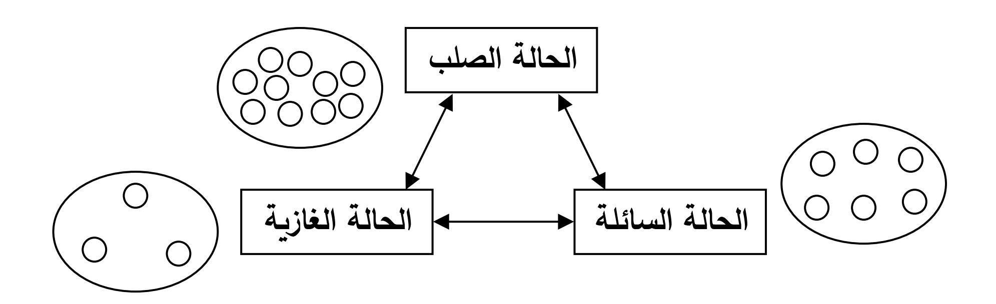


1.1 قانون بقاء المادة :

"المادة لا تفني إلا بقدرة القادر ولا تستحدث من العدم"

ما المقصود بالمصطلح العلمي "المادة" ؟؟؟

يقصد بكلمة المادة هو أن أي شي يوجد في الكون والأرض يطلق عليه باسم المادة ونحن نعلم أن المادة قد تكون في أحدي الصور التالية ويمكن تحويل بعض المواد مثل الماء من صورة إلى أخري حسب الظروف المحيطة بالماء.



وما المقصود بالمصطلح العلمي " ظروف التفاعل " ؟؟؟؟

يقصد بالجملة "ظروف التفاعل" هو البيئة التي يجرى التفاعل الكيميائي فيها ومثال توضيحي لذلك هو بعض التفاعلات تحتاج لطاقة لكي تحدث بمعني أن مادتين A و B إذا تم خلطهما مع بعض لا يحدث بينهما تفاعل عند درجة حرارة الغرفة أي تحت الظروف العادية

ولكن إذا قمنا بتسخين الخليط من هاتين المادتين نلاحظ حدوث تفاعل بينهما. كما أن بعض التفاعلات لا تحدث إلا تحت ضغط معين أو باستخدام حافز أو بالتبريد الشديد عندما يكون التفاعل عنيف ويطلق حرارة عالية فيفضل التبريد خلال خلط المادتين المتفاعلتين أو نسبة المتفاعلات لها دخل في معدل سرعة حدوث التفاعل وغير ذلك كثير.

وكيف يمكننا معرفة حدوث التفاعل من عدمه ؟

هنا لنا وقفه في المعمل . حيث عندما نشاهد تكون غاز نتيجة خلط مادتين A وB ولتكن A صلبة والثانية B سائلة. ماذا يؤكد تكون الغاز ؟ يؤكد :

أولاً : حدوث تصاعد فقاعات من غاز حمض الهيدروكلوريك HCl ، وهذا يدل على أن المادة المتكونة في صورة غاز أي أن الخواص الطبيعية للمتفاعلين A و B قد اختفت وظهرت خواص طبيعية لأحدي النواتج الممثل بالغاز المتكون.

ثانياً: حدوث كسر بين الروابط الكيميائية للمتفاعلات مصاحبة لتكوين روابط جديدة والتفاعل التالي يعتبر مثال تطبيقي على ما ذكر.

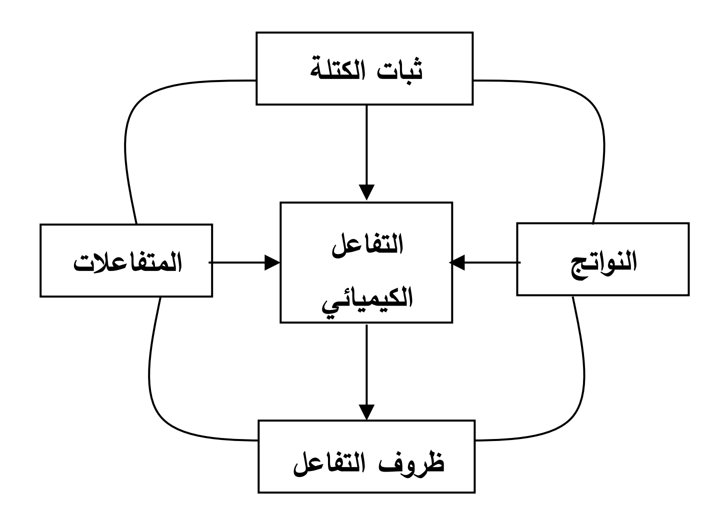
كلوريد الصوديوم + حمض الكبريتيك ← غاز الهيدروكلوريك + كبريتات الصوديوم

كما سوف تقوم بنفسك بإجراء هذا التفاعل الكيميائي في المعمل .... والهدف من ذلك هو أن تذكر لنا ما هو شعورك خلال إجراءك التجربة بنفسك وماذا تعلمت

وما هي المهارة اليدوية وكيفية استنباطك للحقائق العلمية المستندة على مشاهدتك للتجربة. بعد معرفة المصطلحات العلمية : المتفاعلات – النواتج – المادة – ظروف التفاعل – الخواص الطبيعية للمواد – الخواص الكيميائية للمواد – الاستنباط – المشاهدة – كسر الرابطة الكيميائية – التكافؤ – الأيون السالب – الأيون الموجب – رموز بعض العناصر والمجموعات وتكافؤها – حالات المادة الصلبة السائلة الغازية .....الخ.

الآن دعنا نتمعن ما المقصود بقانون حفظ المادة ؟ نحن نقول المادةلا تفني (إلا بقدرة الخالق) ولكن سخر الله عز وجل المادة للإنسان أن يحولها من صورة إلى صورة أخري حسب احتياجه للمادة وخواصها مثل صناعة البلاستيك وهي مادة تتكون من تفاعل بين مواد كيماوية تتفاعل مع بعضها البعض لإنتاج البلاستك ، وتختلف نوعية البلاستك استنادا لاختلاف نوعية المتفاعلات. فهل تعتقد أن كتلة النواتج سوف تختلف عن كتلة المتفاعلات أم لا ؟ سيترك الإجابة على هذا السؤال خلال مناقشة قانون المادة في المحاضر.

يمكن الاستنتاج من العبارة " المادة لا تفني" بمعني أن كتلتها ثابتة مهما تحول لمادة أخرى حتى يوم الدين. فنجد هنا علاقة منظومية بين الطاقة التي يحتاجها التفاعل للحدوث (ظروف التفاعل) والمتفاعلات والنواتج وثبات الكتلة كالتالي.



تدريب تطبيقي 2 :

هل تحول الماء من الصورة الصلبة إلى السائلة بالتسخين يعتبر تغير كيميائي أو فيزيائي ؟

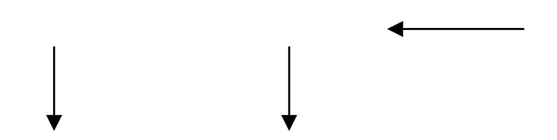
ولكن عند تحلل الماء كهربيا إلى مكوناته غاز الهيدروجين وغاز الأكسجين ... فهل يعتبر هذا التفاعل كيميائي أو خاصية طبيعية (أو فيزيائية) ؟

ستقوم بأجراء التحلل الكهربي للماء بالمعمل وذلك بتركيب الجهاز الموضح بالشكل 1 التالي. وهل تعتقد أن كتلة كل من الناتجين الهيدروجين والأكسجين تساوي كتلة الماء المتحلل كهربياً؟ الإجابة نعم وجدة عملياً وقبل ذلك مذكورة في الديانات السماوية من منطلق تسخير الله للإنسان المادة لكي يحولها من صورة إلى صورة أخرى ولا يستطيع إنسان أن يفني المادة إلا خالقها الله غز وجل يوم الدين.

2.1 الخليط والمركب والعنصر:

نعلم أن المخلوط مثل يتكون من عدة مواد مختلفة قد تكون مركبات وعناصر مثل ماء البحر. ولكن كيف يمكن إثبات أن المركب يتكون من عناصر ؟ يمكن الإجابة على هذا السؤال بالتجربة العملية التي ستقوم بنفسك بإجرائها بالمعمل وهي تحضير غاز ثاني أكسيد الكربون والكشف عنه نتيجة تكسير كربونات الكالسيوم بالتسخين كالتالي:

كربونات الكالسيوم (صلب)ثاني أكسيد الكربون (غاز) + أكسيد الكالسيوم (صلب)



أكسجين (غاز) + كربون (صلب)   أكسجين + كالسيوم (صلب)

يتكسر مركب كربونات الكالسيوم إلي مكوناته الأساسية وهي CO_2 و CaO تدل على :

تحت ظروف تسخين كربونات الكالسيوم يتم تكسيره ليعطي نواتج تؤكد أن كربونات الكالسيوم مركب.

تكسير هذه النواتج بالتسخين الشديد إلى مكوناتها من العناصر تدل على أن هذه النواتج عبارة عن مركبات.

معرفة العناصر الأساسية الناتجة من عمليات التكسير تعطي حقيقة علمية بالرمز الكيميائي لكربونات الكالسيوم ونسبة اتحاد العناصر فيما بينهما في المركب.

العناصر الناتجة لا تقبل بالتكسير تحت الظروف العادية.

نعلم أن الكشف عن غاز ثاني أكسيد الكربون تتم عن طريق تمريره في محلول من ماء الجير فيعكره دلالة على أن الغاز هو CO_2. ماذا نستنتج من تكون هذه العكارة التي هي في الأصل ناتج تكون نتيجة ترسيبه لعدم قابليته للإذابة في الماء.

CO_2 + ماء الجير (محلول من $Ca(OH)_2$ ذائب في الماء)كربونات الكالسيوم (صلب ◄ على هيئة عكارة) + ماء (سائل)

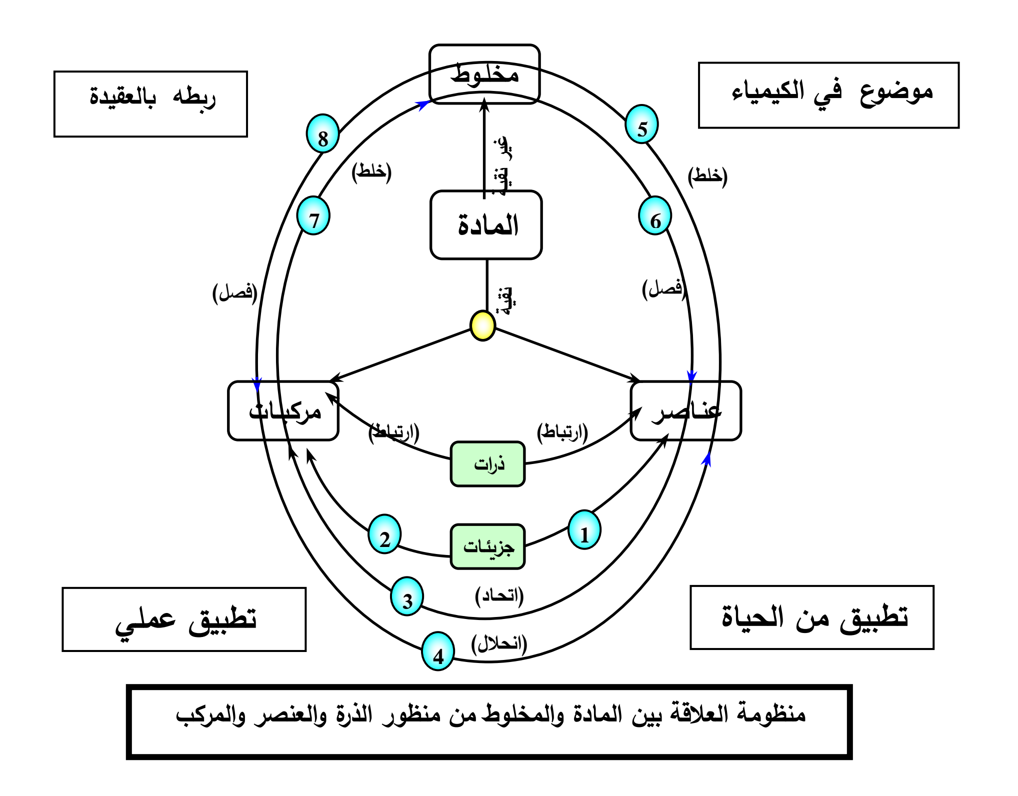
هنا نرى أن الغاز تفاعل مع مركب ذائب في الماء وأنتج مركب صلب وماء سائل المشاهدة تؤكد حدوث تفاعل كيميائي حدث خلاله تكسير لروابط وتكونت روابط جديدة لتعطي مركبات جديدة لها خواصها الفيزيائية والكيميائية بالطبع مختلفة تماماً عن المتفاعلات.

تدريب تطبيقي: 3 قم بكتابة المعادلات الرمزية للتفاعلات أعلاه مع مراعاة التكافؤ ووزن هذه المعادلات؟

تـدريـب تطبيقي 4 : من واقع التعرف على موضـــوعات الكيميـاء التي قمـت بدراســـتها بالمرحلة الثانوية ... قم بكتابة رموز المركبات والعناصر التالية: (يمكنك الاستعانة بالجدول الدوري)

كلوريد الألمونيوم – كلوريد الكالسـيوم – كلوريد الصــوديوم – كبريتات الفضـة – كبريتات الماغنيسـيوم – نترات الألمونيوم – نترات البوتاسـيوم – نترات الكالسيوم. (يفضل مراعاة تكافؤ المجموعات والعناصر المكونة لهذه المركبات).

والمنظومة التي توضح العلاقات بين كل من الخليط والمركب والجزيء والذرة والعنصر هي كالآتي:



منظومة العلاقة بين المادة والمخلوط من منظور الذرة والعنصر والمركب

نري أن الدارس يفضل أن يكون على معرفة أن أربعة عوامل ترتبط برباط منظومي مع منظومة الخليط والمركب والعنصر (ذرة – جزيء) وهي :

(1) موضوع علمي في الكيمياء.

(2) تطبيق عملي على الموضوع العلمي

(3) تطبيق من الحياة

(4) ربط هذه العوامل بالعقيدة وبيئة المجتمع

فإذا تم فهم الموضوعات العلمية بشكل جيد فيمكن ربطها بالعقيدة وتستخير هذه العلوم في التطبيقات الصناعية الزراعية وغيرها ، كما يمكن الاستفادة من هذه الموضوعات العلمية في تطبيقات من الحياة . فدعنا نأخذ مثال على كل من هذه الأربعة عوامل كالآتي:

موضوع علمي في الكيمياء : نحن في هذا القسم من الباب الأول نتناول العاقة المنظومية بين الخليط والمركب والعنصر وتعتبر هذه جميعاً ضمن المصادر الطبيعية أي المواد. مثل منتجات كيماوية تنتج من التفاعلات الكيميائية أو منتجات (في صورة مركبات نقية) تستخرج وتنقي من الطبيعة. فهل تعتبر الطبيعة التي نحن في قلبها تعتبر مخلوط من العديد من المواد باختلاف صورها وأشكالها ؟ الإجابة نعم.

تطبيق عملي على الموضوع العلمي : التطبيق العملي يتركز في تشييد العديد من المنتجات (مركبات أو معادن نقية) عن طريق التفاعلات الكيميائية. مثل تفاعل الماغنيسيوم Mg مع حمض الهيدروكلوريك HCl لإنتاج ملح نقي من كلوريد الماغنيسيوم وغاز الهيدروجين الذي له تطبيقات عديدة في الحياة.

تطبيق من الحياة : نحن نعلم أن الذهب الأسود (الزيت الخام) والنباتات وماء البحر يعتبروا مخاليط من ألوف المركبات الكيميائية والعناصر. ويمكن استخلاص السكر من نبات قصب السكر أو البنجر ثم تنقيته من الشوائب للحصول على مركب السكر

والذي يسمي بسكر القصب أو السكروز. وتنقية الجازولين الذي يستخدم بالسيارات من الزيت الخام. أو عقار يتم استخلاصه وتنقيته من أحدي النباتات الطبية. أو فصل بعض العناصر النادرة من ماء البحر. فهذه الأمثلة ما هي إلا جزء ضئيل جدا يدرج تحت تطبيقات الموضوع العلمي من الحياة. حيث ماء البحر يحتوي على العديد من المواد الذائبة في ماء البحر تزن 3.6 x 1010 كيلوجرام في كيلوجرام مكعب من ماء البحر ، بجانب المواد الذائبة التي تصب في البحار من الأنهار والبراكين. ويمكن استخلاص الملح الطعام من ماء البحر كمنتج يباع في الأسواق بجانب استخلاص صناعي لكل من الصوديوم والكلورين (فيتم استخلاصهم بالتبخير Solar evaporation) والماغنيسيوم والبرومين كمنتجات تسوق عالمياً لأهميتها الاقتصادية ولاستخداماتها المتعددة في الحياة.

ربط هذه العوامل بالعقيدة وبيئة المجتمع : هنا نذكر حكمة الله في خلقه وكونه الذي سخره للإنسان لكي يتعلم منه ويفكر في كيفية تسخير الكون لمصلحته ليرى بأم عينه عظمة الخالق في مخلوقاته .

3.1 القياسات في الكيمياء:

نعلم أن الحسابات الرياضية في الكيمياء هامة من ناحية إذا أردنا أن نقوم بأجراء تفاعل كيميائي فإننا نقوم بأخذ كميات معين ومحسوبة من المواد المتفاعلة بحيث تتفاعل كمية المتفاعل الأول تماماً مع كمية المتفاعل الثاني لتعطي ناتج أو نواتج مجموع أوزانها يساوي مجموع أوزان المتفاعلات. فكيف يمكن معرفة كميات المتفاعلات اللازمة للتفاعل ؟ لكي نتفهم هذه الحسابات يفضل تطبيقها على أي تفاعل كيميائي معروف وليكن:

تفاعل حمض الهيدروكلوريك مع هيدروكسيد الصوديوم يعطي غاز كلوريد الصوديوم وماء.

ولكي نعرف كميات المتفاعلات ونتحقق من سلامة قانون حفظ المادة نتبع التالي:

نتعرف على الرمز الكيميائي لحمض الهيدروكلوريك وهو HCl هيدروكسيد الصوديوم $NaOH$.

نحصل على قيم الكتل الذرية للعناصر المكونة للمتفاعلات وهي H و Cl و Na و O من الجدول الدوري فنجدها: $H = 1$ و$Cl = 35.5$ و$Na = 23$ و $O = 16$.

نحسب الأوزان الجزيئية للمتفاعلات كالتالي: $HCl = 35.5 + 1 = 36.5$ و $NaOH = 23 + 16 + 1 = 40$.

نعلم أن جزئ واحد من حمض HCl يتفاعل مع جزئ واحد من NaOH بمعني أن: 1 مول من الحمض يتفاعل مع 1 مول من القاعدة.

كذلك نعلم أن وزنة تساوي قيمة الوزن الجزيئي لمادة يعبر عنها بواحد مول أي أن: 1 مول من حمض HCl يعتبر 36.5 جرام وواحد مول من القاعدة NaOH يعتبر 40 جرام. فإذا أردنا أن نأخذ 3.65 جم من الحمض فإننا نحتاج إلي 4 جم من القاعدة.

ويمكن مما سبق استنتاج المعادلة الوزنية للمول :

wt.(gm)n =÷ M. wt (gm/mol)

حيث :n = عدد المولات ،

wt. = وزنة المادة بالجرامات ،

M. wt. = الوزن الجزيئي للمادة بوحدة الجرام لكل مول.

تنبيه : للتعرف عن ماهية المول يمكن النظر في كتاب "مسائل وحلول حيث يحتوي على العديد من الأمثلة التطبيقية والحسابية للمول بالباب الأول والثاني.

نعلم أن جزئ من الحمض يتفاعل مع جزئ من القاعدة ليعطي جزء من الملح وجزئ من الماء – كذلك أن مجموع أوزان المتفاعلات = مجموع أوزان الناتج

1 mol HCl + 1 mol NaOH → 1 mol NaCl + 1 mol H_2O

هذا يعني أن جزئ من الحمض يتفاعل مع جزئ من القاعدة – ونعلم أن 1 مول من أي مادة تساوي عدد أفوجادرو من جزئيات نفس المادة.

فإذا أخذنا 2 جرام من القاعدة NaOH فكم جرام نحتاج من حمض HCl لكي تتفاعل كل الجرامين من القاعدة مع هذا الحمض. لكي نعرف كمية الحمض نتبع التالي: نحصل على عدد مولات القاعدة بحكم معرفة كميتها 2 جرام ونحسب الوزن الجزيئي للقاعدة مادام نعرف رمزها الكيميائي وهو 40 من المعادلة الوزنيه للمول:

$$40\ (gm/mol) = 0.05\ mol \div\ n\ of\ NaOH =\ 2\ (gm)$$

هذا يعني أن عدد مولات القاعدة = 0.05 مول وتكافئ 2 جرام.

وبما أن 1 مول من الحمض يتفاعل مع 1 مول من القاعدة فيمكن الاستنتاج بأن 0.05 مول من القاعدة تتفاعل مع 0.05 من الحمض.

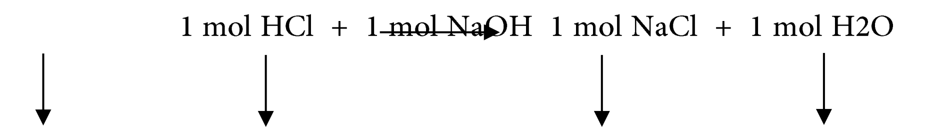
والآن يمكن حساب كمية الحمض من معرفة عدد مولاته ووزنه الجزيئي من الرمز الكيميائي له HCl الذي يساوي 36.5 كالتالي:

$$M.\ wt.\ (36.5\ gm/mol) \div n\ of\ HCl\ (0.05\ mol) = wt.\ (gm)$$

إذا wt.(gm) = وزن حمض HCl = 0.05 × 36.5 = 1.825 جم

ولنعود للمعادلة الرمزية السابقة:

1 mol HCl + 1 mol NaOH 1 mol NaCl + 1 mol H_2O



فنجد أن : النواتج المتفاعلات

0.05 mol0.05 mol 0.05 mol0.05 mol

2 gm1.825 gm ? gm ? gm

ولكي نطبق قانون بقاء أو حفظ المادة على التفاعل يجب أن تكون مجموع كتلة النواتج تساوي مجموع كتلة المتفاعلات والتي هي تساوي 3.825 = 2 gm + 1.825 gm جم

وزنة الملح = 0.05 × (23+35.5) = 2.925 جم

وزنة الماء = 0.05 × (16 + 2) = 0.9 جم

نجد أن مجموع النواتج = 2.925 + 0.9 = 3.825 جم يساوي مجموع المتفاعلات وبهذا نكون حققنا قانون حفظ المادة . ونكمل المعلومات على مخطط التفاعل الرمزي كالتالي:

1 mol HCl + 1 mol NaOH 1 mol NaCl + 1 mol H_2O

فنجد أن :النواتج المتفاعلات

0.05 mol0.05 mol 0.05 mol0.05 mol

2.925 gm2 gm1.825 gm 0.9 gm

وبالباب الثاني سيتم عرض أغلب الحسابات الكيميائية الضرورية في علم الكيمياء بهذا الكتاب ، كما توجد العديد من المسائل الحسابية الكيميائية بكتاب "مسائل وحلول واختبار من متعدد في ...".

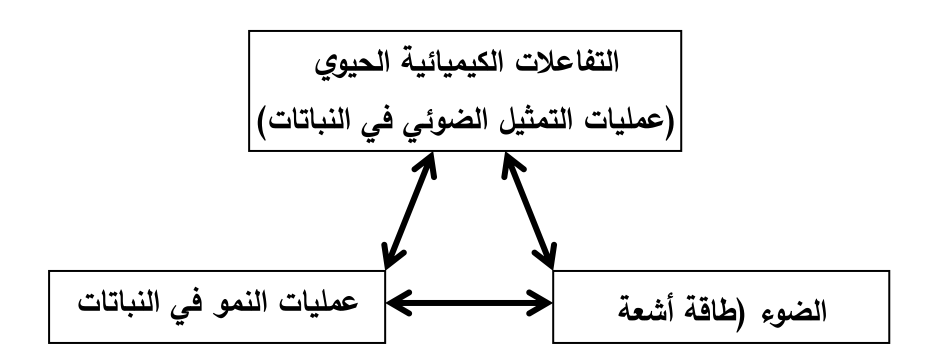
4.1 الخواص الفيزيائية والخواص الكيميائية :

نعلم من دراساتنا السابقة أن تحويل الماء من الحالة السائلة للحالة البخارية بالتسخين طبعاً يعتبر تفاعل فيزيائي لأن إذا تم تبريد البخار سيعود للماء هذا يدل على عدم حدوث كسر بين الروابط الكيميائية التي تربط الذرات فيما بينها في جزئ الماء. ولكن إذا قمنا بتحلل الماء كهربيا فإننا نجد تحول الماء إلي غاز أكسجين O_2 وغاز هيدروجين H_2 فهذا يدل على حدوث كسر بين الروابط الكيميائية التي تربط ذرات جزئ الماء مع بعضها البعض والذي يؤكد ذلك هو أن الخواص الكيميائية وكذلك الفيزيائية لنواتج تحلل الماء كهربيا تختلف اختلافاً كلياً عن الخواص الكيميائية والفيزيائية للماء . كما هو موضح في الشكل أعلاه.

5.1 الطاقة :

نعلم أن الإنسان لا يستغني عن الطاقة في حياته ،وبدون طاقة لن توجد حياة على الأرض وأول ما نلاحظ هي الطاقة الشمسية التي وهبنا إياها خالق الكون عز وجل. فهل هناك علاقة منظومية تربط حرارة أشعة الشمس التي تصل للأرض خلال النهار وعلم الكيمياء؟

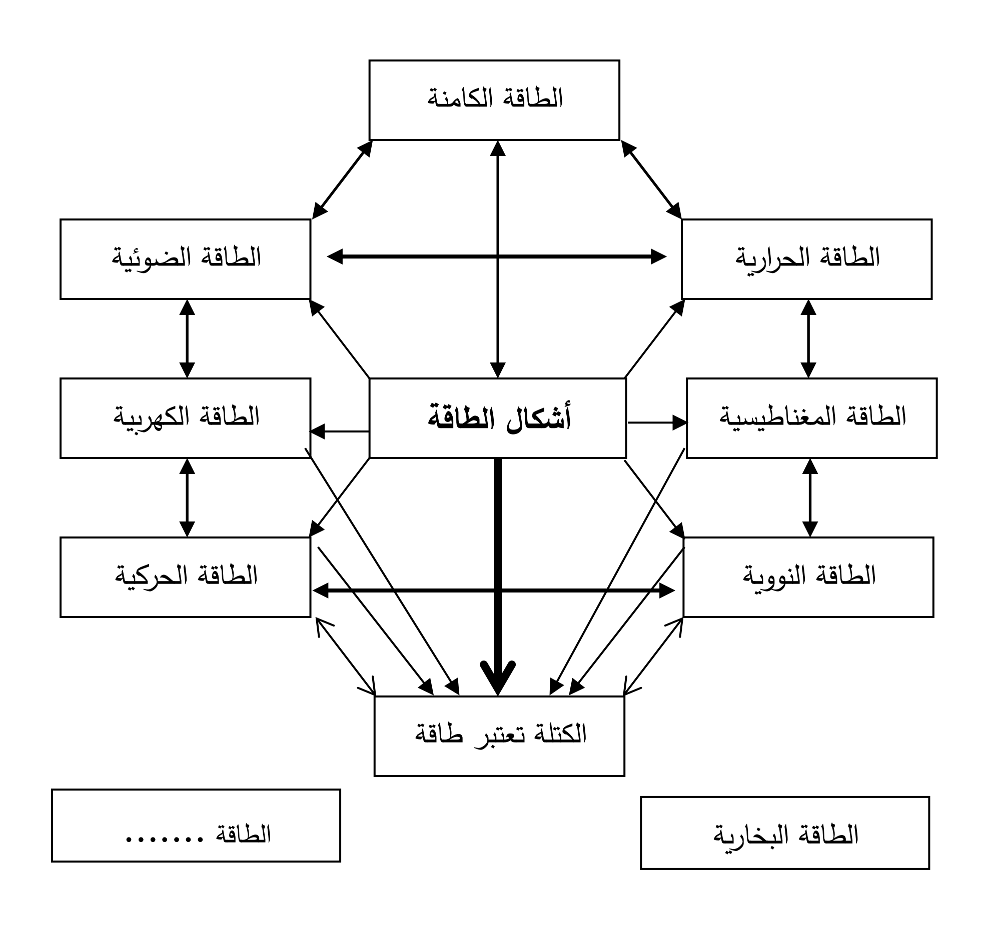
نعم وألف نعم ولكن ما شكل هذه العلاقة ؟ الإجابة على هذا السؤال تكمن في التالي كالمثال توضيحي: هل تحدث عملية النمو في النباتات بدون عملية التمثيل الضوئي ؟ وهل تتم عمليات التمثيل الضوئي في النباتات في معزل عن ضوء الشمس؟ الإجابة عن هذين السؤالين أن تعلم أنها لا . وهل تعتبر عمليات التمثيل الضوئي هي في الأصل تفاعلات كيميائية حيوية؟ الإجابة نعم . هذا يحقق العلاقات المنظومية التالية بين الثلاثة عناصر وهي النمو – الضوء – التمثيل الضوئي (تفاعلات حيوية).



نعلم أن غاز ثاني أكسيد الكربون CO2 من العناصر الضرورية لحدوث التمثيل الضوئي في النباتات وكذلك الماء والأملاح والضوء (الطاقة الضوئية). فما دخل التفاعل الكيميائي الحيوي هنا في عملية التمثيل الضوئي؟ هنا مربط الفرس .....

نعلم أن كل من CO2 والماء H2O وبعض الأملاح تتحول في وجود الضوء إلي مواد كربوهيدراتية وبروتينات وليبيدات داخل النبات ، وتعبر هذه هي مواد البناء الأساسية أو تسمي بعملية النمو في النباتات . الآن نتمعن هل حدث كسر كيميائي للروابط الكيميائية للمتفاعلات في كل من CO2 و H2O ؟ نعم . إذا تعتبر عمليات التمثيل الضوئي تفاعلات كيميائية في الأصل ويطلق عليها حيوية لأنها تحدث داخل الكائن الحي وهو النبات وتمسي بتفاعلات كيميائية فقط إذا حدثت خارج الكائن الحي أي في المعمل الكيميائي أو المصنع أو..... الخ.

ونعلم أن للطاقة أشكال مختلفة كثيرة منها الطاقة الحرارية – الطاقة الضوئية – الطاقة الكهربية – الطاقة الحركية (الديناميكية) – الطاقة المغناطيسية – الطاقة النووية – الطاقة اليدوية – الطاقة ..... الخ. والمنظومة توضح العلاقات التي فيما بين هذه الطاقات التي هي في الأصل من مصدر واحد وهو خالقها عز وجل.



نلاحظ من تصميم المنظومة أعلاه أنها تعبر عن وجود علاقات منظومية تربط كتلة المادة بالأشكال المختلفة للطاقة في منظومة متكاملة سخرها العزيز الجبار للإنسان أن يستعملها على الأرض في معيشته. فنجد أن مادة الفحم تحتوي على طاقة كامنة وحين يتم حرق كتلة معلومة من الفحم نحصل على مقدار من الطاقة الحرارية يعتمد على كمية الفحم المستخدم. وهذا يحقق قانون أينشتاين. كما أستطاع الإنسان من تسخين الماء ليحصل على الطاقة بخارية التي توضع في خزانات مضغوطة وذلك لتحويلها لطاقة حركية ديناميكية لتشغيل القطارات قديماً. وأستمر التطور العلمي ليصل حالياً لتشغيل القطارات بالطاقة النووية.

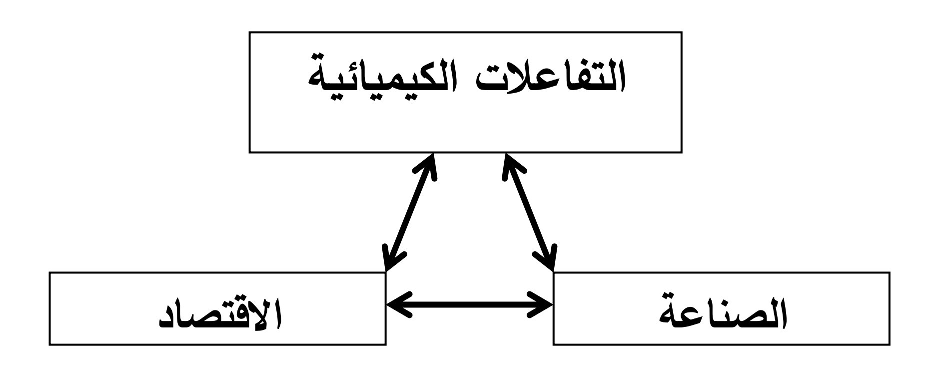
الآن نلقي الضوء على ماهية العلاقة بين علم الكيمياء والطاقة ، فليعلم الجميع أن تطبيقات أي علم من العلوم الدنيوية تحتاج للطاقة في احدي أشكالها الموضحة أعلاه. فبالتالي تكمن العلاقة بين الطاقة وعلم الكيمياء في أن التفاعل الكيميائي لا يحدث إلا إذا حدث كسر روابط و/أو تكوين روابط كيميائية وهذا يحتاج لمقدار من الطاقة تناسب مقدار طاقة كسر الروابط و/أو طاقة تكوين الروابط. ومن هذا المنطق نجد أن علم الكيمياء يحتاج لجميع أشكال هذه الطاقات المشار لها أعلاه. حيث سيتم حساب الطاقة الحرارية في الكيمياء الحرارية والطاقة النووية في علم الكيمياء الإشعاعية والطاقة الديناميكية والحرية في علوم الكيمياء الفيزيائية والطاقة البخارية في فرع علوم الكيمياء الغازية و....... الخ.

فهذا يدل على أن لا وجود للكيمياء إذا كانت غير مرتبطة بالعلوم الأخرى مثل الرياضيات وذلك لإجراء المسائل الحسابية واللغة العربية لكي نعبر عن نتائج التجارب الكيميائية والاستنتاجات. وعلم الفيزياء والأحياء والتطبيقات الصناعية وخلافه.

ومثال آخر يوضح التطبيق العملي في الحياة بين الطاقة الكهربية وسلك النحاس كالتالي: يوجد في المنازل – المصانع – المحلات - .... الخ أسلاك نحاسية يسير فيها التيار الكهربي فكيف توصل الإنسان لهذا ؟ نحج في استغلال الطاقة الكهربية في الرقي بمستوي معيشته وذلك عن طريق مجهودات الباحثين والمفكرين على السواء (تعتبر كوادر بشرية) باستخراج النحاس من الطبيعة (وتعتبر كوادر طبيعية) وتنقيته وتشكيله في الصناعة على هيئة أسلاك (وهذا يربط الصناعة بكيمياء المعادن) – علم الفيزياء والهندسة توصلوا لاكتشاف الكهرباء والكيميائي توصل لمعرفة المعادن جيدة للتوصيل الكهرباء مثل النحاس.هذا كلام ممتاز ولكن ما هي علاقة كل هذا مع الطاقة؟ الآن نستطيع القول إذا تم تمرير مقدار كبير من الطاقة الكهربية في سلك نحاس سمكه ضئيل ... ماذا تتوقع حدوثه ؟ بالطبع سوف ينقطع التيار الكهربي فورا بانقطاع سلك النحاس. إذن نحن في حاجة لحساب الطاقة الكهربية بأي وحدة تدل على مقدار هذه الطاقة بالأمبير أو الفولت أو .... وقوة تحمل السلك النحاسي استنادا لسماكته ونقاوته. وفي هذا المقرر سوف نتعرض لأغلب أشكال الطاقة وسيتم حساب بعضها عن طريق معادلات رياضية تطبق على أنواع مختلفة من التفاعلات الكيميائية البسيطة.

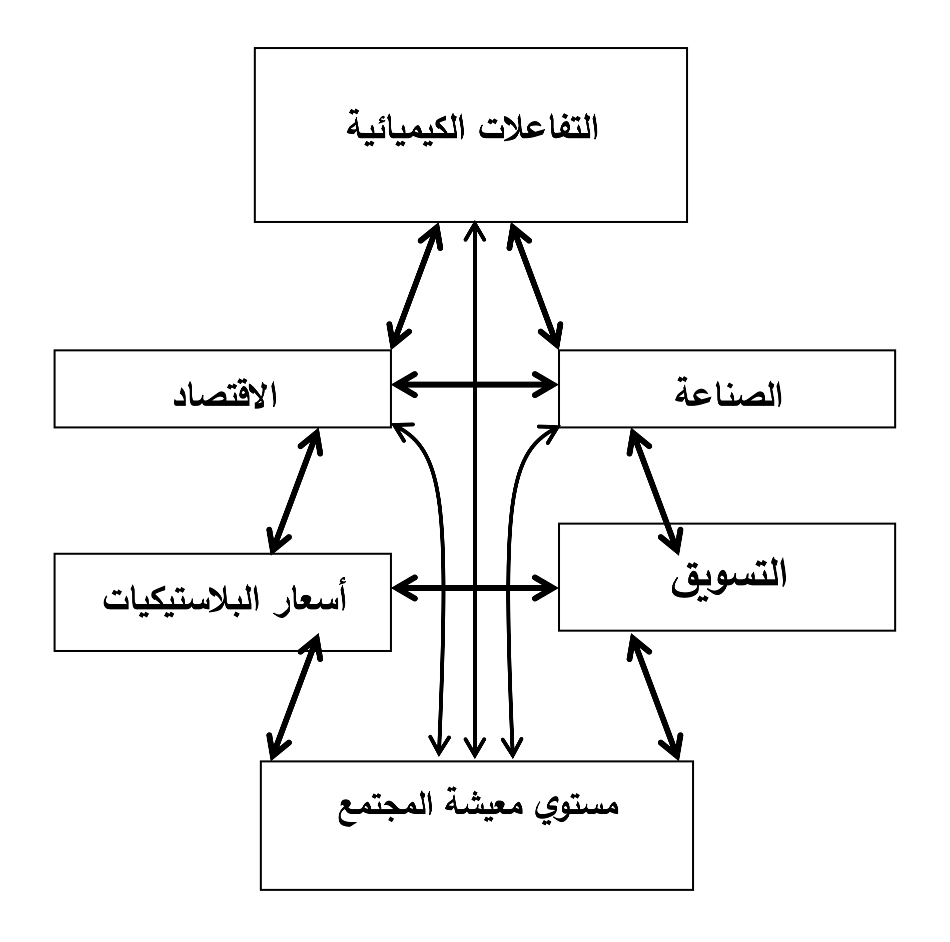
6.1 التفاعل الكيميائي :

سبق وذكرنا ماهية التفاعل الكيميائي بأنه تفاعل يحدث بين المتفاعلات ويعطى نواتج نتيجة اختلاف طاقات كسر روابط المتفاعلات وطاقات تكوين الروابط في النواتج. إذا يمكن حساب فرق الطاقة بين مجموع طاقات المتفاعلات ومجموع طاقات النواتج وهذا يحدث عن طريق معرفة طاقة كل رابطة في المتفاعلات والنواتج. والآن نود أن نوضح العلاقة الترابطية بين أهمية التفاعلات الكيميائية والصناعة وعلاقتهما المنظومية باقتصاد الدولة كما هو موضح بالمنظومة التالية :



تحتاج الدولة إلي كل من الموارد البشرية والممثلة بالخبرات والمفكرين والعلماء وما في حكمهم وإلي الموارد الطبيعية مثل البترول والنباتات والمعادن والأمطار و.....الخ.

وألان دعنا نأخذ مثال واقعي من حياتنا بالمملكة العربية السعودية (حفظها الله ورعاها). من مشتقات البترول (الذهب الأسود) مواد كيماوية تستخدم في صناعة البلاستيكيات. نستنتج من ذلك أن إذا كانت تكلفة هذه المواد وتفاعلاتها لإنتاج البلاستيكيات معقولة اقتصاديا وتصنيعها من مواد تعتبر مشتقات بترولية معقول اقتصاديا فهذا ينعكس على ثمن بيعها في الأسواق المحلية بالمملكة وتصديرها كذلك. هذا يدل على أن العلاقة بين التفاعلات الكيميائية والصناعة والاقتصاد علاقة قوية تنعكس على معدل أسعار المنتجات ومعدل المستوي المعيشي للمجتمع. فإذا كان المستوي المعيشي للمجتمع على مقدرة لشراء هذه المنتجات فهذا يدل على أن تكلفة المواد الكيميائية التي تتفاعل مع بعضها البعض في تفاعلات كيميائية بالصناعة لإنتاج سلع تجارية مناسبة للبيع في الأسواق. هنا نجد أننا تعرضنا بجانب أهمية التفاعل الكيميائي والصناعة والاقتصاد إلي كل من: (1) تسويق المنتجات (2) ومستوي معيشة المجتمع (3) وأسعار بيع المنتجات التجارية :



أغلب العناصر التي في هذه المنظومة تعتمد على تكلفة المواد الأولية التي تدخل في التفاعلات الكيميائية والتكلفة الكلية الصناعية من آلات وعمالة و....الخ. ويكون العلم لجميع طلاب جامعات المملكة بان الله وهبنا في جزيرتنا العربية كل من الطاقة البشرية والطاقة الطبيعية

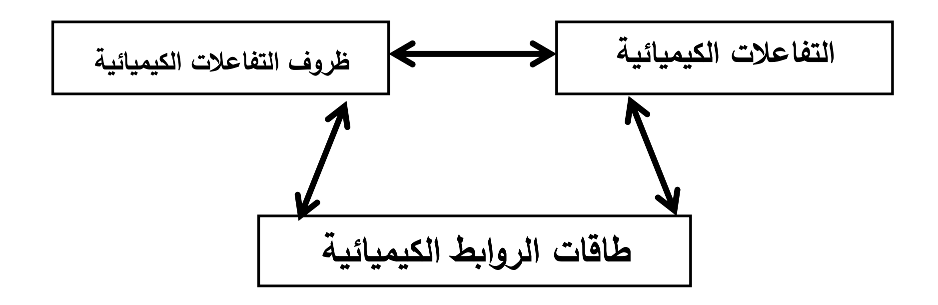
فأنتم الطلاب تعتبروا الطاقة البشرية المفكرة المستقبلية لتسخير الطاقة الطبيعية (الكامنة في الموارد الطبيعية) لإنتاج منتجات ترفع من مستوي معيشة مجتمعنا بالمملكة. كما أن المملكة تتطلع لزيادة نمو التنمية الوطنية ، وهذا لن يحدث بدون نوعية مخرجات جامعات المملكة التي يجب أن تتسم بالفكر والعقلانية والحكمة في العمل الجاد والتمعن في أهمية وتطبيقات التفاعلات الكيميائية بالنسبة للدارسين لمادة الكيمياء من قسم الكيمياء أو الهندسة أو الزراعة أو الطب أو الصيدلة أو.....الخ. كما أن هناك علاقة منظومية بين هذه التخصصات وعلم الكيمياء العضوية سيتم إبرازه في الباب الأخير من هذا المرجع للاستفادة العامة لرفع من تميز نوعية الخرجين من جامعاتنا بمملكتنا الحبيبة التي يجب أن ننتمي لها ونوقرها ونخلص العمل لها ، وسيكون (إن شاء الله) هو العامل الأساسي لتميز مستوي وجودة معيشة مجتمعنا الإسلامي بين مجتمعات العالم.

7.1 الروابط الكيميائية :

كما ذكرنا سابقا أن التفاعل الكيميائية يحدث نتيجة كسر و/أو تكوين روابط كيميائية. فحدوث الكسر أو التكوين يكون نتيجة طاقة فعالية المتفاعلات وطبيعة المواد الناتجة من التفاعل. فنحن نعلم (سبحان الله) أن كل من على الأرض في حركة مستمرة للوصول للاستقرار وهذا يحدث عندما تكون المادة في مستوي طاقي منخفض مثل الماء في صورة الثلج تكون جزيئاته قريبة جدا من بعضها البعض

وفي حالة مستقرة نتيجة وجود قيود في حرية حركة الجزيئات هذا ما دامت الطاقة خارجها بمعني أن الماء معزول عن الحرارة الخارجية أي الثلج في بيئة حرارية صفر أو أقل. وعند تعرض الثلج للحرارة تدخل هذه الحرارة بين الجزيئات لتزيد من المسافة بينها مما يؤدي لتحويل الثلج لسائل ، وإذا زادت الحارة تزداد المسافة بين الجزيئات ليتحول السائل لبخار مائي ، هذه تعتبر ظاهرة طبيعية.

والفرق بين طاقات الروابط الكيميائية في المركبات الكيميائية تسيطر وتتحكم بشكل مباشر على مسارات التفاعلات الكيميائية وحسب ظروف التفاعل الكيميائي. والمنظومة التالية تبرز علاقات منظومية فيما بين:



فنجد أن بعض المتفاعلات الكيميائية عند مزجها مع بعضها البعض وهي في الصورة السائلة و/أو الصلبة مثلاً داخل إناء زجاجي وعند درجة حرارة الغرفة ويضاف حافز لهم أو.....فيطلق على هذه العوامل بظروف التفاعل.

نشاهد:

(1) حودث فوران

(2) وتصاعد غاز

(3) وزيادة درجة حرارة إناء التفاعل بشكل سريع جداً

نتيجة المشاهدة:

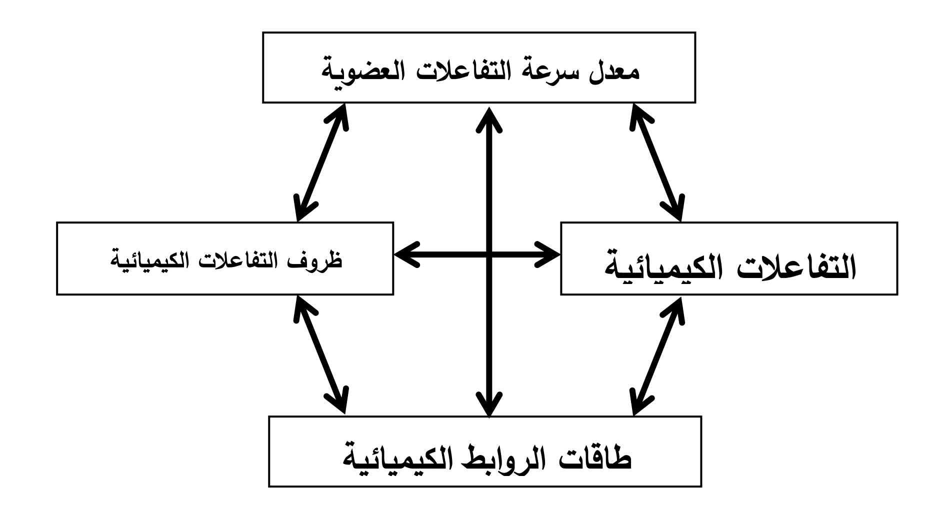
تدل على حدوث تفاعل كيميائي عنيف قد يصل لدرجة الانفجار وانتشار أجزاء الزجاج والمواد الغازية الناتجة في الجو ... هذا قد يعمل على حدوث أضرار سامة على الإنسان أو البيئة بشكل عام من المواد الغازية الناتجة أو جروح من انتشار أجزاء الإناء الزجاج المنكسر نتيجة زيادة درجة حرارته وضغط الغاز المتصاعد من التفاعل.

الآن نقول لماذا حدث هذا التفاعل بشكل عنيف وقد يصل للانفجار بالرغم من أن ظروف التفاعل كانت عند درجة حرارة الغرفة.

نستنتج من هذه النتيجة:

أن التفاعل طارد للحرارة لأن مجموع طاقات روابط المتفاعلات اكبر بكثير من مجموع طاقات المواد الناتجة . ما علاقة حدث التفاعل الكيميائي بطاقات الروابط ؟ الإجابة تكمن في مقدار الطاقة الحرارية خلال مزج المتفاعلات كانت كافية لحدوث كسر بين الروابط التي تربط الذرات في كل جزئ من جزئيات المتفاعلات. هذا الكسر ولد طاقة كبيرة جزء صغير منها يكفي لتكوين روابط جديد بديلة عن ما كسرة في النواتج وباقي الطاقة تخرج من وسط التفاعل على هيئة طاقة حرارية. ويمكن التحكم في ظروف هذا التفاعل بأن نبرد المتفاعلات خلال مزجها ، فبالتالي نجد أن معدل سرعة التفاعل تقل ويترتب على ذلك ملاحظة صعود الغازات الناتجة وارتفاع الحرارة يحدث ببطء يعتمد على معدل تبريد المتفاعلات خلال تفاعلها مع بعضها البعض. ومثال آخر نجد أن بعض المتفاعلات عندما نمزجها مع بعض لا نشاهد أي تغير إلا إذا تم تسخين هذا المزيج فنشاهد مثلا زيادة في درجة حرارة التفاعل أو العكس. هذا يعتمد في المقام الأول والأخير على مقدار الطاقة الكامنة الكلية للمتفاعلات والتي تتمثل بطاقات الروابط في بين ذرات جزيئاتها.

ومما سبق نلاحظ كذلك أن معدل سرعة التفاعل الكيميائي تعتمد على الظروف التي يجرها فيها التفاعل الكيميائي. وهذا العنصر يمكن إضافته في المنظومة السابقة كالتالي:



الكيمياء العضوية :

تم تقسيم التفاعلات الكيميائية إلى نوعين رئيسيين بصورة عامة هما التفاعلات العضوية والتفاعلات المعدنية ومثال على كل حالة هو:

مادة عضوية مثل بروتين أو سكر أو ...co_2 + H_2O + طاقة(1)

حمض معدني HCl + قاعدة NaOH ملح الطعام NaCl + ماء (2)

التفاعل (1) : تفاعل عضوي لا يحدث إلا بالتسخين ومعدل سرعة تفاعله بطيئة جدا بالمقارنة بـالتفاعل(2) : تفاعل غير عضوي (تفاعل معدني) يحدث عند درجة حرارة الغرفة في جزء من الثانية الواحدة.

هذا يدل على أن طاقات كسر الروابط في المتفاعلات تعتمد على طبيعة هذه المتفاعلات فنجد أن التفاعل العضوي (1) لا يحدث عند ظروف معينة وهي التسخين لدرجة الحرق ويأخذ وقت أطول بكثير ومعدل سرعة بطيئة بالمقارنة للتفاعل اللاعضوي المعدني حيث يحدث عند درجة حرارة الغرفة وبمعدل سرعة رهيبة.والمنظومة السابقة ينطبق عليها هذين التفاعلين.... هذا إذا تمعنا العلاقات بين الأربعة عناصر الأساسية وهي :

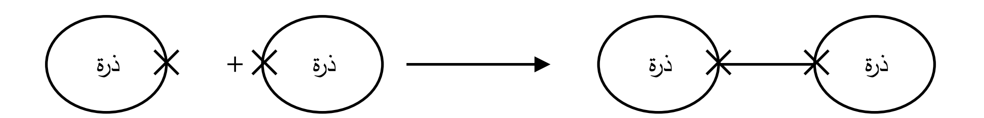
(1) التفاعل الكيميائي. (2) طاقات الروابط الكيميائية.

(3) ظروف التفاعلات الكيميائية .(4) معدل سرعة التفاعلات الكيميائية.

وهنا لكي نتعرف على مقدار طاقة الروابط التي تتحكم في مسار التفاعلات الكيميائية يفضل أن نعرف أنواعها أولاً وكيف تتكون في صورة مدارات جزيئية تربط الذرات فيما بينها داخل الجزيء. ثم يلي ذلك التعرف على طاقاتها ويلي ذلك حساب هذه الطاقات لمعرفة هل التفاعل يعتبر طارد للحرارة (أي الحرارة أحدي نواتج التفاعل) أو ماص للحرارة (أي الحرارة أحدي المتفاعلات).

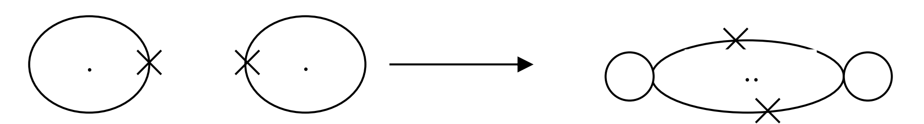
أنواع الروابط الكيميائية هي : روابط تساهمية (روابط سيجما وروابط باي) - روابط أيونية - روابط تناسقية. وتشترك جميع الروابط الكيميائية في أن أي رابطة كيميائية تتكون من إلكترونيين مهما كان نوعية هذه الرابطة.

فالرابطة التساهمية بين أي ذرتين تتكون من مشاركة كل ذرة بإلكترون كالتالي.



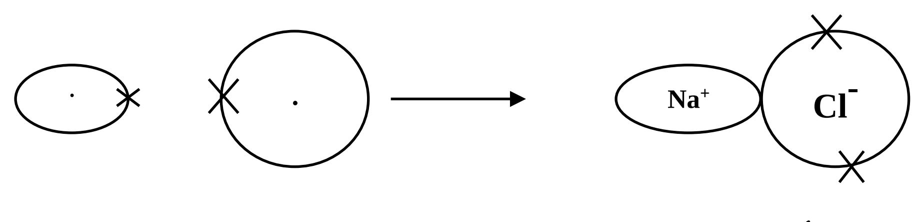
حيث :__ تمثل الرابطة بين الذرتين

ويوجد داخل الكثافة الإلكترونية الممثلة بالإلكترونيين المشار لهما بالشكل بعلامة x نواتي الذرتين . وتسمي هذه الكثافة الإلكترونية بالمدار الجزيئي الذي يطلق علية باسم الرابطة الكيميائية بين الذرتين. لذا نوضحها بإشارة الشرطة __ التي تربط الذرتين مثلا بين ذرتي الهيدروجين H __H كالتالي:



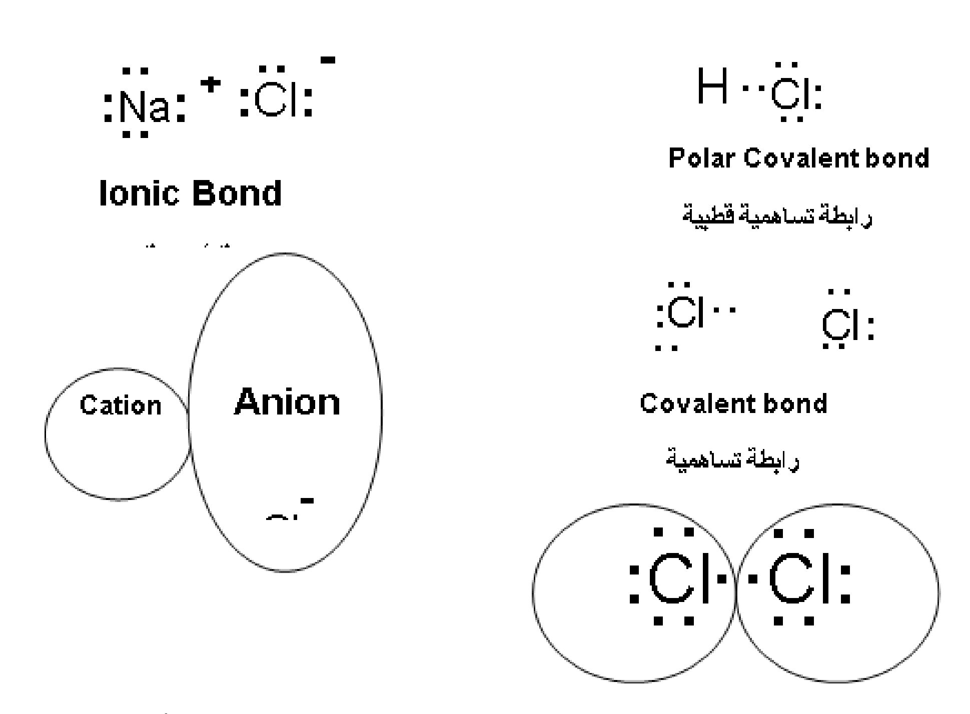
أما الرابطة الأيونية فهي تتكون بين ذرتين عندما ينتقل إلكترون من أحدي الذرتين إلي الذرة الأخرى مثل الرابطة الأيونية بين ذرتي الكلور Cl و الصوديوم Na ،

فنجد أن ذرة الصوديوم تمنح إلكترونها الأخير وتتحول لأيون موجب وتكتسب ذرة الكلور هذا الإلكترون لتصبح أيون سالب مرتبط برابطة أيونية قوية مع أيون الصوديوم الموجب كالتالي:



الرابطة الأيونية ذرة كلور ذرة صوديوم

وعموما تعتبر طاقة كسر الروابط الأيونية أعلى بكثير من طاقة كسر الروابط التساهمية. وأغلب المركبات العضوية تحتوي على روابط تساهمية أما المركبات غير العضوية فتحتوي كلها على روابط أيونية. ويمكن تمثيل الروابط التساهمية والأيونية بإشكال لويس كالتالي.



وتوجد نوعين من الروابط التساهمية وهما رابطة تساهمية سيجما والأخرى رابطة تساهمية باي. وتعتبر طاقة الرابطة سيجما 83 كيلو سعر حراري لكل مول أعلى من طاقة الرابطة باي 64 كيلو سعر حراري لكل مول (Kcal/mol).

ونظرية المدارات الجزيئية ونظرية التهجين توضح الفرق بين تكوين كلا الرابطتين سيجما وباي. وسوف يتم توضيح ذلك بالباب الرابع. والباب الأخير من الكتاب يوضح تسمية المركبات العضوية وأنواع التشكيلات البنائية والفراغية للمركبات العضوية وبعض تفاعلات الكيمياء العضوية.

9.1 الوحدات والقياسات :

تم إتباع الوحدات المترية عالمياً من واقع اتفاقات المنظمة المحلية للقياسات والتقنية الأمريكية national Institute of Standards and Technology(NIST) ، ولاجتماع آراء العلماء بالعالم على استعمال الوحدات المترية عن طريق National Bureau of) Standards)NBS عام 1964م . وتم تعميم الوحدات المترية عالميا ، واستعمل النظام العالمي للوحدات SI)International System of Units) لسبعة وحدات كالتالي:

الأطوال بالمتر – الكتلة بالكيلوجرام – الزمن بالثانية – التيار الكهربي بالأمبير – درجة الحرارة بالكلفن كمية المادة بالمول – Luminous intensity بالـ candela(cd) .

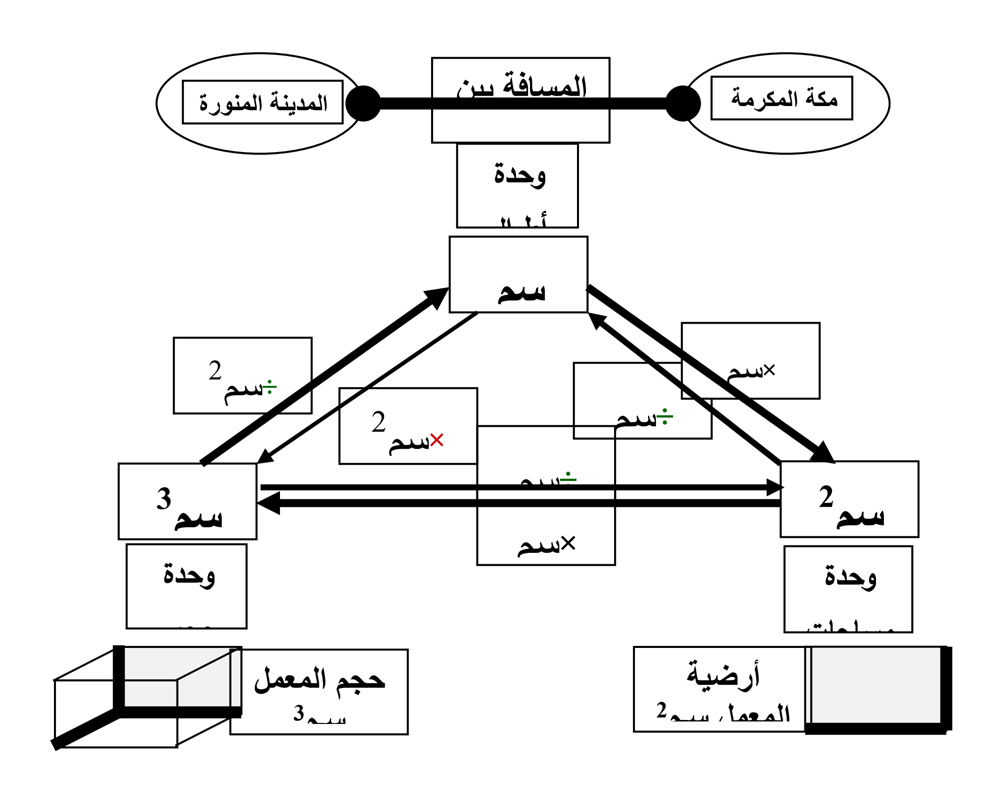
وأعتمد الوحدات على المترية والنظام العلمي للوحدات SI على أساس أنها من مضاعفات العشرة كالتالي.

وحدات الكتلة	وحدات الأطوال
1 طن Tonne = 1 x 103 كلجم	1 كيلو جمKg = 1 x 103 جم
1 ملجمmg = 1 x 10-3 جم	1 ميجا مترMm = 1 x 106 متر m
1 ميكروجم ug = 1 x 10-6 جم	1 كيلو مترKm = 1 x 103 متر m
1 نانوجم ng = 1 x 10-9 جم	1 دسي متر dm = 1 x 10-1 متر m
1 بيكوجم pg = 1 x 10-12 جم	1 سمcm = 1 x 10-2 متر m
وحدات الحجوم	1 ملم mm = 1 x 10-3 متر m

1 مل = 1 سم(cm3)3 = 10-3 لتر L   1 نانومترmm = 10-6 x 1 متر m

1 م3 = 106سم3 = 103 لتر L   1 أنجستروم mm = 10-9 x 1 متر m

وتوجد علاقة منظومية بين الأطوال والمساحات والحجوم موضحة بالمنظومة التالية:



ومن وحدات المساحة والحجوم نستطيع تذكر معادلة حساب المساحات والحجوم من منطلق علاقتهما بوحدة الأطوال. والمساحات تكون عموماً على البعدين 2D أي على المستوي وتحسب من قيم الأطوال على محورين س ، ص (x , Y) ويطلق عليها الطول في العرض. أما حساب الحجوم فتعتبر على ثلاثة أبعاد 3D أي خارج من المستوي وتحسب من قيم الأطوال على الثلاثة محاور وهي X , Y, Z (س ، ص ، ع).

أما ما يخص بالوزن فيوجد معيارين هما :

الكتلة Mass : ويعبر عن كمية المادة فقط المراد معرفة كتلتها.

الوزن Weight : ويعبر عن مقدار جذب الجاذبية الأرض gravitational attraction لكمية المادة المراد معرفة وزنها.

وعندما نتعامل مع الأعداد الضخمة جدا والتي تحتوي على العديد من الخانات مثل 134000000000 أو ضئيلة جدا مثل 0.000000058 يفضل استعمال طريقة مختصرة للخانات العلمية Scientific Notation بأن تكون في الصورة التالية : بالنسبة للعدد الضخم يمثل بـ 1.34 x 1011 والعدد الضئيل يمثل بـ 5.8 x 10-8 .

ونستخدم الأرقام المعنوية لمعرفة مدي الخطأ في الوزنة مثلا أو عند قياس طول معين أو حجم معين ، فنلاحظ أن أخر رقم على اليمين يطلق علية رقم الشك. ومثال توضيحي على ذلك هو عندما نزن مادة ونجد وزنتها 1.4532 جم على ميزان حساس يحتوي على خمسة أرقام عشرية، فنلاحظ أن الرقم الأخير في العدد هو رقم 2

وهو يعتبر رقم الشك ويدخل ضمن الأرقام المعنوية ويمكن إجراء عملية التقريب له فنجد الرقم أقل من خمسة فيتم إهماله ، أما إذا كان هذا الرقم خمسة أو أعلى فيتم إهماله مع رفع الرقم التالي بمقدار واحد مثل 1.457 فهنا رقم الشكل 7 فيمكن إهماله مع رفع الرقم التالي وهو 5 بمقدار واحد ليصبح العدد 1.46ويحتوي هذا العدد على ثلاثة أرقام معنوية وهنا يجب مراعاة حساسية الميزان المستخدم.

أما إذا استخدم ميزان حساس يحتوي على خمسة أرقام عشرية لقياس الوزنة 1.4532 جم فسوف نحصل على الرقم الدقيق بدلا من الرقم 2 الأخير على اليمين وهو يتراوح من 1 إلى 9، ويكون الرقم الخامس هو رقم الشك ، فوجد عمليا أن العدد أصبح أدق 1.45380 جم ويكون هذا العدد مكون من ستة أرقام معنوية والرقم صفر هو رقم الشك ..... وهكذا.

ويحتوي كتاب "مسائل وحلول على العديد من الأمثلة وطريقة شرح إيجاد الأرقام المعنوية للأعداد المجموعة أو المطروحة أو المضروبة أو المقسومة.

وقاعدة معرفة الأرقام المعنوية لناتج الجمع والطرح يجب أن تساوي نفس الأرقام العشرية الأقل التي تحتوي أحدي الأعداد المراد جمعها أو طرحها.

مثال: (أ) قم بجمع العدد 24.82 مل و 12.6 مل .

(ب) وطرح 35.3462 من 43.69.

الحل : (أ) 24.82 + 12.6 = 37.42 وهنا يتم إهمال رقم الشك 2 ليصبح ناتج الجمع 37.4 يحتوي على ثلاثة أرقام عشرية (ويظهر العدد في الآلة الحاسبة 37.42 .

(ب) 43.69–35.3732 = 8.3168 ويتم تقريب هذا الناتج بشكل أن يحتوي على رقمين عشريين فقط مثل العدد الذي يحتوي على أقل أرقام عشرية ضمن الرقمين المطروحين، أي يصبح الناتج 8.32 بعد إهمال الرقمين 6 و 8 مع إجراء عملية التقريب ليصبح الناتج يحتوي على ثلاثة أرقام معنوية فقط (ويظهر الناتج على الآلة الحاسبة 8.3168).

وقاعدة معرفة الأرقام المعنوية لناتج القسمة والضرب يجب أن تساوي نفس الأرقام المعنوية لأصغر عدد من الأعداد المراد ضربهاأو قسمتها.

مثال : أحسب مساحة أرض طولها 10.34 متر وعرضها 4.78 متر ؟

الحل : ينظر لوحدات الطول والعرض إذا كانت مختلفة يتم عمل تحويلات الوحدة. ثم يتم حساب المساحة كالتالي : المساحة = الطول بالمتر × العرض بالمتر = 10.34 م × 4.78 م = 49.4252 م2 ويتم تقريب ناتج الضرب بشكل أن يحتوي على ثلاثة أرقام معنوية فقط ليصبح 49.4 م2 وذلك بإهمال كل من الأرقام 2 و 5 و 2 دون التقريب لأن الرقم المهمل أقل من 5 . (ويظهر ناتج الضرب على الآلة الحاسبة 49.4252).

وننظر للمثال التالي وذلك لتوضيح الإستراتيجية المستعملة في حل المسائل بكتاب "مسائل وحلول واختيار من متعدد في أسس الكيمياء العامة" التي استعمل فيها طريقة معامل الوحدة Unit Factor Method أو تسمي بطريقة التحليل ألبعدي . Dimensional Analysis

مثال : احسب قيمة المقدار 2.39 ميل بوحدة الأنش مع حساب الأرقام المعنوية في الناتج.

الحل : لكي نصل لحل الصحيح يفضل تحويل وحدة الميل للعدد إلى وحدة القدم ثم لوحدة الأنش المطلوبة بالمثال. Mile = feet = inch وقيم التحويلات هي: 1 mile = 5280 feet

و 1 feet = 12 inch على ضوء هذه المعطيات يتم تصميم المعادلة الرياضية التي تحتوي على أعداد التحويلات مقرونة بوحداتها باستخدام المقص على النحو التالي:

1.00 mile5280 feet

xfeet 2.39 mile

$$x = \frac{2.39\,\text{mile} \quad x \quad 5280\,\text{feet}}{1\,\text{mile}} = 126192\,\text{feet}$$

1.00feet 12 inch

x inch 126192 feet

$$x = \frac{126192\,\text{feet} \quad x \quad 12\,\text{inch}}{1\,\text{feet}} = 1514304\,\text{inch}$$

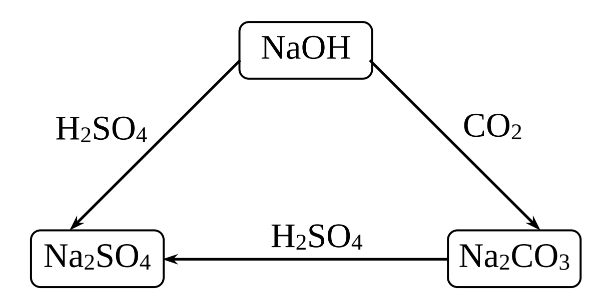
وهنا ننظر لتشطيب الوحدات بالمعادلتين السابقين فهذا يعتبر منطقي لأن الوحدة المتبقية هي المطلوبة، وهذا يزيد من التأكد على سلامة التطبيق الرياضي السليم لحل المثال. أما إذا قمنا بحل المثال بدون وضع الوحدات بالقرب من كل عدد فيوجد احتمال للخطأ وذلك لعدم توفر طريقةأو إستراتيجية للتأكد من سلامة وحدة ناتج المعادلة الرياضية. لذا يفضل إضافة الوحدة بجانب كل عدد بالمعادلات الرياضية ثم يلي ذلك تشطيبها حسب القواعد الرياضية المعمول بها والتأكد من الوحدة أو الوحدات المتبقية وهي التي تعتبر وحدة أو وحدات الناتج.

بما أن المقدار بالمثال يحتوي على ثلاثة أرقام معنوية فبالتالي يجب أن يتم تقريب الناتج ليحتوي على ثلاثة أرقام معنوية فقط ليكون 1.51 x 106 (ويظهر على الآلة الحاسبة 1514304). أما أعداد التحويلات لا تأخذ بالاعتبار في تحدد العدد المحتوي على أقل أرقام معنوية بحكم أنها أعداد تحويل الوحدات ولكن يأخذ بالاعتبار العدد الناتج من القياسات العملية وفي هذا المثال هو الطول المحسوب بوحدة الميل ويحتوي على ثلاثة أرقام معنوية أي أن الناتج يجب أن يحتوي هو الآخر على ثلاثة أرقام معنوية. ونعلم أن أي العشرة المرفوعة بأس أي عدد لا تدرج ضمن الأرقام المعنوية بمعني أن الناتج 1514304 يحتوي على 7 أرقام معنوية ولكن يتم تقريبه للرقم 1510000 وهذا العدد كذلك يحتوي على 7 أرقام معنوية ، ولكي يحتوي على ثلاثة ويكون معبر عن نفس العدد يتم إظهاره كالتالي: 1.51 x 106 وهذا العدد يحتوي على ثلاثة أرقام معنوية فقط لأن لا يحسب الـ 10x ضمن الأرقام المعنوي 0أنظر كتاب "مسائل وحلول واختيار من متعدد....".

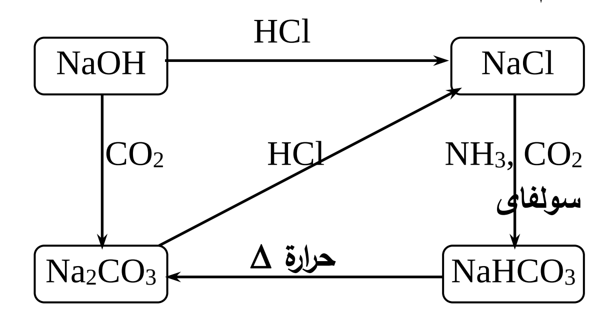
ويحتوي كتاب "مسائل وحلول ....." على القواعد التي تستخدم رفي التعرف على الأرقام المعنوية ويحتوي الكتاب كذلك على العديد من المسائل الخاصة بحساب النسبة المئوية Percentage وقيم الكثافة والكثافة النوعية Specific gravity للمواد السائلة وقياس المحتوي الحراري وإيجاد قيم درجات الحرارة بوحدة الكلفن.

10.1 المنظومة المعملية :

يمكن تمثيل التفاعلات الكيميائية على هيئة تفاعلات منظومية بدلا من التفاعلات الخطية وذلك برسم منظومة العاقة بين كل من هيدروكسيد الصوديوم - كربونات الصوديوم - كبريتات الصوديوم.



وكذلك بين كل من : بيكربونات صوديوم - كربونات صوديوم - كلوريد صوديوم - هيدروكسيد صوديوم.

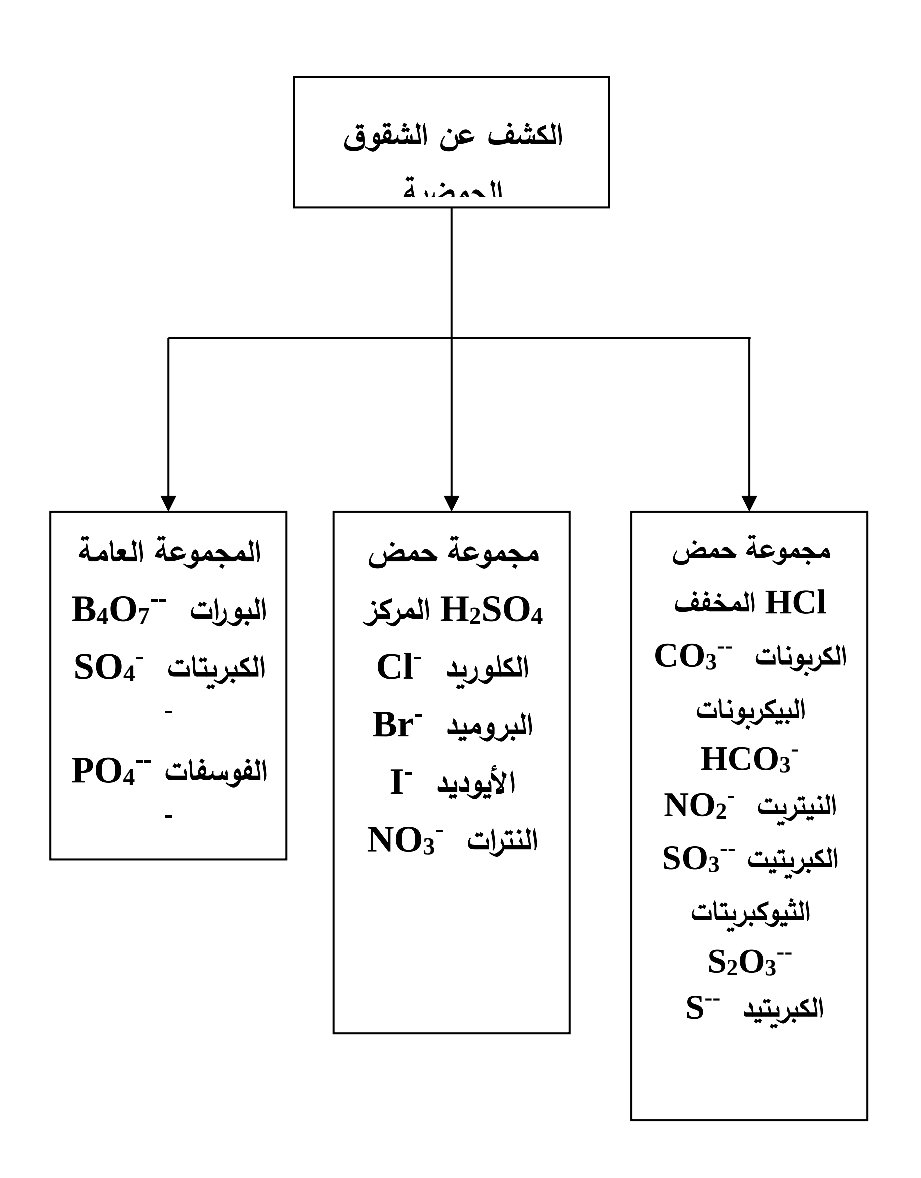


فنلاحظ في المنظومتين السابقة أننا تمكنا من الاستفادة من خواص بعض الأحماض والقواعد والأملاح في إجراء عدة تفاعلات استبدالية منظومية ، يمكن تطبيقها عملياً بالمعمل الكيميائي باستخدام المعمل الميكروكيميائي المتنقل الخاص ببرنامج الكيمياء الخضراء.

والدارس لمادة مبادئ الكيمياء العامة سيقوم بأجراء الكشف عن الشقوق الحامضة والشقوق القاعدية في الأملاح . ذلك بإجراء تفاعلات كيميائية لتلك الأملاح مع العديد من الكواشف ليستطيع التعرف على الشق الحمضي بالملح ثم الشق القاعدي بنفس الملح لكي يتعرف على الملح الذي يرغب معرفة هويته. والمنظومات التالية توضح كيفية الكشف عن الشقوق الحمضية في أملاحها كالتالي:

منظومات الكشف عن الشقوق الحمضية

تتعلق بثلاثة منظومات لثلاثة مجموعات هي :


الكشف عن الشقوق الحمضية
مجموعة حمض HCl المخفف
الكربونات CO_3^{--}
البيكربونات HCO_3^{-}
النيتريت NO_2^{-}
الكبريتيت SO_3^{--}
الثيوكبريتات $S_2O_3^{--}$
الكبريتيد S^{--}
مجموعة حمض H_2SO_4 المركز
الكلوريد Cl^{-}
البروميد Br^{-}
الأيوديد I^{-}
النترات NO_3^{-}
المجموعة العامة
البورات $B_4O_7^{--}$
الكبريتات SO_4^{--}
الفوسفات PO_4^{---}

الفصل السادس عشر

الكيمياء النووية تعريفها وأستخدمها

تعتبر الكيمياء النووية من أحد أهم فروع الكيمياء وأيضا من العلوم الحديثة فاتجاه العالم الآن الى الطاقة النووية يعطي للكيمياء النووية مزيدا من الأهمية ومن المعروف أن التفاعل النووي يحدث بطريقتين إما أن تكون بانقسام النواة أوباندماج نواتين مع بعضهما وكلا الطريقتين تنتج طاقة هااااائلة جدا ولكن طريقة انقسام النواة تنتج طاقة أكبر من الطريقة الثانية إبمعنى التفاعل النووي ببساطة هو تحوّل جزء صغير من المادة الى طاقة هائله جدا فلو حوّلنا 7جرامات من اليورانيوم الى طاقة لاستطاعت هذه الطاقة أن تسيّر أكبر ناقلة نفط في العالم حول الأرض سبع مرات.

كما أن تحوّل جرامواحد من أي عنصر الى طاقة لعادلت هذه الطاقة ما ينتجه حرق 1000 كيلو جراممن الفحم من طاقة . ولذلك لا عجب أن تستخدم الصواريخ المنطلقة الى الفضاءالوقود النووي.

يهتم الكيميائيون كثيراً بالتفاعلات الكيميائية Chemical reactions والتي تشمل في الغالب انتقال الإلكترونات من مادةلأخرى أو من عنصر لآخر ، ويولون اهتماماً أقل بالتفاعلات النووية Nuclear reactions والتي تشرك فيها الذرة نواتها في التفاعل.

إلا أن الآونه الأخيره شهدت اهتماماً أكبر من قبلهم بالتفاعلات النووية نظراً لاستخدامها في كثير من المجالات كاستخدامالطاقةالهائلة الناتجة عن التفاعلات النووية في توليد الطاقة الكهربائية ، وفيتسيير الغواصات والسفن والمركبات الفضائية، واستخدام العناصر المشعة في وخصوصاً في علاج مرض السرطان ، واستخدام النظائر المشعة في تقدير أعمارالصخور والأحافير ، واستخدامها أيضا ً في تحديد آلية التفاعلات الكيميائية ، وغيرها الكثير من المجالات.

وعلى الرغم من تلك الاستخدامات الرائعة للتفاعلات النووية ، إلا أن لها وجهاً آخر أسود ، يسيء به دائما ً لسمعة التفاعلات النووية وهي بالتأكيد الأسلحة النووية والتي راح ضحيتها الآف الضحايا في هيروشيما وناغازاكي، ولا يزال للآن يعاني أهلها جراء ذلك .

تعال معي الآن لنتعرف على كيفية حدوث التفاعل النووي ، ومصدر الطاقة الهائل فيه، وكيف يمكن استغلالها في الوجهين السلمي والعسكري وغيرها من الموضوعات.

التفاعل النوويNuclear reaction :

تعودنا في دروس الكيمياء أن نتعامل مع التفاعل الكيميائي.

ولكن ماذا عن التفاعل النووي وبماذا يختلف عن التفاعل الكيميائي ؟

التفاعل الكيميائي هو إعادة ترتيب للذرات دون المساس بصفاتها ، ويتضمن تكسير روابط كيميائية وتكوين أخرى جديدة ، كما ويتضمن التفاعل الكيميائي في الغالب انتقال إلكترونات بين المواد المتفاعلة دون أن يحدث تغير على النواة ، ودونأن تتكون ذرات جديدة.

لاحظ ذلك من خلال تفاعل الهيدروجين مع الأكسجين لتكوين الماء:

لاحظ أن التفاعل الكيميائي السابق لم ينتج عناصر جديدة ، فعنصري الهيدروجين والأكسجين الموجودين على يسار التفاعل بقيا موجودين على يمين التفاعل ولكن الاختلاف بين المتفاعلات والنواتج هو تكسر الرابطة بين ذرتي الهيدروجين وتكسر الرابطة بين ذرتي الأكسجين ، وتكونت روابط جديدة بين ذرات الهيدروجينوالأكسجين ، ويتضمن التفاعل الكيميائي طاقة قليلة.

أما التفاعل النووي فيتضمن تغيراً في نواة الذرة ، وينتج عنه تكون عناصر جديدة ، كما تنتج عنه كمية عالية جداً من الطاقة.

لاحظ ذلك من خلال التفاعل النووي التالي:

لاحظأن التفاعل السابق قد تضمن تحول عنصر الراديوم (Ra) إلى عنصر جديد هوالرادون (Rn) ، وظهر مع النواتج عنصر ثان هو الهيليوم(He) .

النظائرIsotopes

تختلف العناصر فيما بينها في العدد الذري (عدد البروتونات) إلا أن هنالك عناصر تتشابه في العدد الذري وتختلف فيما بينها في العدد الكتلي وتعرف هذه العناصر بالنظائر.

تعني كلمة نظير (المكان نفسه) أي أن لها نفس المكان في الجدول الدوري ، إذ أنها لا تختلف فيما بينها في العدد الذري.

وعادةً ما يتم التعبيرعن النظائر بدلالة كتلها الذرية ، لأن أعدادها الذرية ثابتة.

مثال 1:

للهيدروجين (العدد الذري للهيدروجين = 1) ثلاثة نظائر مشهورة، تشترك جميعها فياحتوائها على نفس العدد من البروتونات (العدد الذري) . وتختلف فيما بينهافي عدد النيوترونات (العدد الكتلي).

يسمى كل نظير نسبة إلى عدده الكتلي:

يسمى النظير الأول للهيدروجين (هيدروجين - 1)

يسمى النظير الثاني للهيدروجين (هيدروجين - 2) أو الديوتيريوم.

يسمى النظير الثالث للهيدروجين (هيدروجين - 3) أو التريتيوم.

نظائر الهيدروجين

ظاهرة النشاط الإشعاعيRadioactivity

هنري بيكريل 1908 - 1852م اكتشاف ظاهرة النشاط الإشعاعي في الأول من مارس (آذار) عام 1896 كان العالم الفرنسي هنري بيكريل يدرس خصائص بعض المعادن ، وكان مهتماً بالتحديد بدراسة قابليتها على عكس الضوء المرئي عند تعرضها لضوء الشمس ، ومن بين تلك المعادن عينة من خام اليورانيوم.

وبمحض الصدفة لاحظ بيكريل انبعاث أشعة غير مرئية من خام اليورانيوم دون أن يتعرض لأشعة الشمس ، وقد أثرت هذه الأشعة بشكل غير متوقع على فلم فوتوغرافي بنفس الطريقة التي يؤثر فيها الضوء المرئي على الفلم الفوتوغرافي.

أما الصدفة التي أدت إلى هذا الكشف فقد كانت عندما تعرض فلم فوتوغرافي موضوع في أحد أدراج مكتب بيكريل للأشعة غير المرئية الناتجة عن أحد أملاح اليورانيوم الموضوع صدفة في الدرج نفسه ، وعند تظهير الفلم بعد أربعة أيام لاحظ ظهور صورة مفتاح على الفلم ، وقد كان المفتاح موضوع أصلاً على صفيحة الفلم الفوتوغرافي.

الفلم بعد أن قام بيكريل بتظهيره:

سميت ظاهرة إطلاق العناصر لأشعة غير مرئية بظاهرة النشاط الإشعاعي.

تعرف اليوم ظاهرة النشاط الشعاعي بأنها ظاهرة الانبعاث التلقائي للدقائق أو الطاقة من أنوية الذرات المشعة.

وقد قاد اكتشاف بيكوريل إلى بدايات النظرية الذرية الحديثة ، وإلى اكتشاف عناصر جديدة.

العناصر المشعةRadioactive Element :

اكتشاف الراديوم:

ماري كوري:

1934 -1867اهتم كل من بيير كوري Pierre Curie وزوجته ماري كوري Marie Curieبدراسة خصائص اليورانيوم وخاماته، وقد تبين لهما أن جميع خامات اليورانيومتظهر نشاطاً إشعاعياً متوسطاً باستثناء أحد الخامات والمعروف بإسم خامالبتشبلند المستخرج من بوهيميا،وقد أظهر هذا الخام نشاطاً إشعاعياً يفوق الخامات الأخرى بأربع مرات.

بيير كوري:

1906 -1859في عام 1898اكتشف الزوجين كوري عنصرين مشعين جديدين في خام البتشبلند أسموهما البلوتونيوم والراديوم ، ووجودهما في الخام هو سبب زيادة النشاط الإشعاعي للخام.

عزل الزوجين مليغرامات قليلة من كلوريد الراديومRaCl2 ، وقد تطلبت عملية عزل تلك الكمية الضئيلة أكثر من 10.000 عملية بلورة وإعادة بلورة.

وللراديوم نشاط إشعاعي يزيد عن النشاط الإشعاعي لليورانيومبنحو 1.000.000 مرة ، ولم يتسنى لمدام كوري عزل عنصر الراديوم بشكل نقي إلاعام 1910 . استحق الزوجين كوري جائزة نوبل في الفيزياء بالمشاركة معبيكريل عام 1903 لدورهما في النشاط الإشعاعي.

مصدر الراديوم:

يوجد الراديوم في خامات اليورانيوم بنسبة لا تزيد عن جزء إلى 3.000.000 جزء مناليورانيوم ، وتتطلب عملية استخلاصه جهداً مضنياً ، وتستخرج خاماته منأوروبا وأفريقيا وشمال كندا.

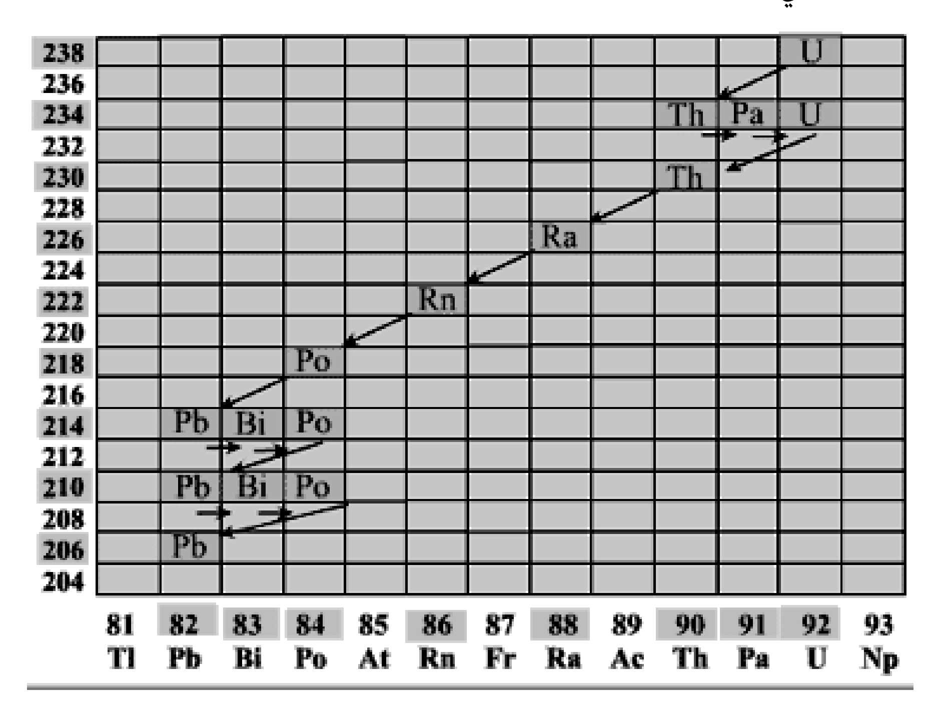
يوجد الراديوم في خاماته على شكل كلوريد وبروميد وكربونات الراديوم ، وهو مشع بشكله الحر أو على شكل مركبات.

سلاسل النشاط الإشعاعيRadioactive Series

جميع العناصر المشعة تنتمي إلى واحدة من ثلاث سلاسل تسمى كل واحدة منها سلسلة النشاط الإشعاعي ، تبدأ السلسلة الأولى بنظير اليورانيوم (238) ، والثانية بنظير اليورانيوم (235) ، بينما تبدأ الثالثة بنظير الثوريوم (232) ، وتوضح هذه السلاسل مراحل تحلل العنصر المشع.

الشكل الآتي يوضح سلسلة تحلل اليورانيوم (238) إلى رصاص (206).

العدد الكتلي



العدد الذري

سلسلة تحلل اليورانيوم (238) الى رصاص (206):

طاقة الربط النوويBinding Energy

تتكون نواة الهيليوم من بروتونين ونيوترونين ، ويمكن القول بأن:

تبلغ كتلة نواة الهيليوم 4.0015 وحدة كتلة ذرية.

تبلغ كتلة البروتون 1.0073 وحدة كتلة ذرية.

تبلغ كتلة النيوترون 1.0087 وحدة كتلة ذرية.

وبما أن نواة الهيليوم تتألف من بروتونين ونيوترونين، لذا يمكن حساب كتلة نواة الهيليوم على النحو التالي:

كتلة بروتونين = 2 × 1.0073 كتلة نيوترونين = 2 × 1.0087

كتلة بروتونين = 2.0146 كتلة نيوترونين = 2.0174

مجموع كتل البروتونات والنيوترونات = 2.0146 + 2.0174

4.0320 =وحدة كتلة ذرية

وبمقارنة كتلة الهيليوم الفعلية بمجموع كتل مكونات نواتها يلاحظ أن هنالك فرقاً في الكتلة:

يبلغ الفرق في الكتلة بين نواة الهيليوم الفعلية ومجموع مكوناتها 0.0305 وحدةكتلة ذرية ، ويتول هذا الفرق في الكتلة طبقاً لمعادلة أينشتاين ط = ك س2إلى طاقة ، تتحرر عندما تتكون نواة الهيليوم وتدعى هذه الطاقة بطاقة الربطالنووي.

طاقة الربط النووي : الطاقة المتحررة عند تكون أنوية الذرات من اتحاد مكوناتها.

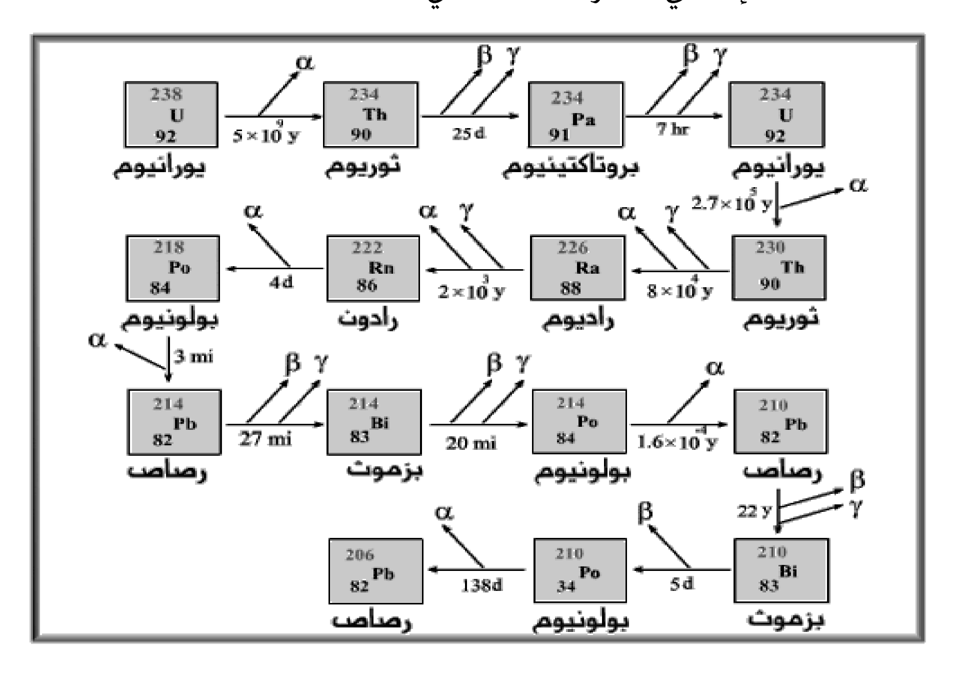
سرعة التحلل الإشعاعيRate of Radioactive Decay

تتحلل أنوية العناصر غير المستقرة بسرعات مختلفة ، فبعضها يحتاج لملايين السنين لكي يتحلل ، والبعض الآخر بحاجة لثوان لفعل ذلك.

تسمى الفترة الزمنية اللازمة لتحويل كتلة معينة من العنصر غير المستقر إلى نصفتلك الكتلة بعمر النصف (half – life) ويرمز لها بالرمز. (t 1/2)

ولكل نظير غير مستقر عمر نصف محدد خاص به ، فعلى سبيل المثال يبلغ عمر النصف للبزموث (214) (20) دقيقة (t 1/2 = 20 mi)، وهذا يعني أنه لو بدأنا بـ (10) غرام من البزموث ،سيبقى (5) غرام منه بعد مرور (20) دقيقة ، ونحتاج لـ (20) دقيقة أخرىلتحويل الـ (5) غرام من البزموث إلى (2.5) غرام ... وهكذا.

وللملاحظة سرعة كل خطوة والدقائق والأشعة التي تنتج من كل خطوة من خطوات سلسلة النشاط الإشعاعي ، انظر للمخطط التالي:



الزمن المعطى بين الخطوات يمثل فترة نصف العمر:

s : ثانية i : دقيقة d : يوم m : شهر Y : سنة أنواع التفاعلات

النوويةTypes of Nuclear Reactions

يمكن تقسيم التفاعلات النووية الى أربعة أقسام وهي:

التحلل النووي التلقائي. Radioactive decomposition

التفاعل النووي غير التلقائي. Nuclear disintegration

الانشطار النووي. Nuclear fission

الاندماج النووي. Nuclear fusion

.التحلل النووي التلقائي.

تتحلل أنوية العناصر الثقيلة غير المستقرة تلقائياً إلى أنوية أخف وأكثر استقراراً ، ويصدر عنها دقائق ألفا أو بيتا أو أشعة غاما.

أمثلة:

تحول نظير اليورانيوم تلقائياً إلى نظير الثوريوم وانطلاق دقيقة ألفا .

تحول نظير الثوريوم تلقائياً إلى نظير البروتاكتينيوم وانطلاق دقيقة بيتا.

المفاعلات النووية Nuclear Reactors

المفاعل النووي جهاز يستخدم للتحكم بالتفاعل النووي المتسلسل ويستخدم للحصول على الطاقة ولتحضير النظائر لعناصر جديدة.

أجزاء المفاعل النووي:

يتألف المفاعل النووي من الأجزاء الرئيسة التالية:

أولاً : الوقود النووي:

ويستخدم اليورانيوم الطبيعي في أغلب الأحيان كوقود في المفاعلات النووية على شكل اسطوانات صغيرة ، وفي بعض المفاعلات يستخدم اليورانيوم الطبيعي الغنيباليورانيم – 235 ، ويتم الحصول على الطاقة بانشطار اليورانيوم – 235 أوانشطار البلوتونيوم الناتج من اليورانيوم – 238 في اليورانيوم الطبيعي ، ويوضع الوقود النووي في حيز يسمى قلب المفاعل النووي.

ثانياً : المهديء:

وهي المواد التي تعمل على إبطاء النيوترونات السريعة ، وتكون عادة من الغرافيت، ويمكن استخدام الماء العادي أو الماء الثقيل كمهديء.

ثالثاً : قضبان التحكم:

وتتألف من قضبان من البورون أو الكادميوم أو الكوبالت ، لقابليتها على امتصاص النيوترونات ، وبذلك يمكن التحكم بسير التفاعل.

يتم التحكم بشدة التفاعل النووي عن طريق قضبان التحكم ، فعندما نرغب بتقليل سرعة الانشطار النووي يتم انزال قضبان التحكم بهدف امتصاص النيوترونات فتقل سرعة التفاعل ، وترفع القضبان عندما نرغب بزيادة سرعة التفاعل.

فصل نظائر اليورانيوم:

تعتمد شدة التفاعل النووي المتسلسل على نسبة اليورانيوم – 235 في الوقود النووي ، فكلما زادت نسبته كانت كمية الطاقة الناتجة أعلى ، ومن هنا تكمن الحاجة لفصل نظائر اليورانيوم عن بعضها للحصول على يورانيوم – 235 أنقى.

ومن الصعب فصل نظائر اليورانيوم عن بعضها بطرق كيميائية لأن نظائر العنصرالواحد متشابهه في السلوك الكيميائي ، إلا أن اختلاف النظائر في السلوك الفيزيائي يسهل علينا فصلها عن بعضها ، فالنظيرين يورانيوم – 235 ، ويورانيوم – 238 يختلفان عن بعضهما في الكتلة.

العلماء الذين عملوا على صناعة القنبلة النووية اكتشفوا العديد من الطرق لفصل نظائر اليورانيوم ، واحدى تلك الطرق طريقة الإنتشار الغازي والتي تعتمد على الاختلاف البسيطفي الانتشار خلال غشاء شبه منفذ بين سادس فلوريد اليورانيوم – 235 i92U235F6 وسادس فلوريد اليورانيوم – 238 i92U238F6 مما يؤدي إلى اتخاذ كلمنهما مسارين مختلفين عند التأثير عليهما بمجال كهرمغناطيسي مما يؤدي إلى فصلهما.

تطبيقات التفاعلات النوويةApplications of Nuclear Reactions

أولاً : توليد الطاقة الكهربائية

المفاعل النووي:

تمثل التفاعلات النووية مصدراً مهماً للطاقة ، ففي الولايات المتحدة الأمريكية ، فمثلاً تشكل الطاقة الكهربائية التي يتم الحصول عليها منالطاقة النووية 20% من مجمل الطاقة الكهربائية في البلاد.

التأثير الحيوي الإشعاعي:

تتعرض أجسامنا بشكل يومي للأشعة من مصدريها الطبيعي والصناعي ، فعلى سبيل المثال تتعرض أجسامنا للأشعة تحت الحمراء والأشعة فوق البنفسجية والأشعة المرئية الصادرة عن الشمس وأمواج الراديو والتلفزيون الصادرة عن محطات البث الإذاعي والتلفزيوني والأشعة السينية (أشعة) X الصادرة عن الإجراءات الطبية المختلفة ، كما أن أجسامنا تتعرض لأشعة مصدرها التربة ، وجميع هذه المصادروغيرها من مصادر الإشعاع تصدر طاقة تؤثر في خصائص المادة المستلمة لتلك الإشعاعات.

وعندما تمتص المادة الإشعاع تؤدي طاقتها إلى تهييج أو تأيين المادة. يحدث التهيج عند انتقال الإلكترونات إلى مستوى طاقة أعلى أو عند زيادة حركة الجزيئات أو ارغامه على التحرك أو الدوران أو الاهتزاز ، أما التأين فيحدث عندما تعمل طاقة الإشعاع على إزالة الكترون من الذرات أو الجزيئات. وبشكلعام تسمى الأشعة التي تعمل على تأيين الذراتأو الجزيئات بالأشعة المؤينة Ionizing radiation ، وهي من أكثر أنواع الأشعة تأثيراً على الأنظمةالحيوية كأنسجة جسم الإنسان فتعمل على تأيينها.

معظم الأنسجة الحيةتحتوي على 70% ماء بالكتلة ، وعند تعرضها للإشعاع فإن الماء فيها يتأين ،ومن الشائع تعريف الأشعة المؤينة على أنها الأشعة التي تؤين الماء ، وتتطلبهذه العملية 1216 كيلوجول/مول على الأقل لعمل ذلك ، ومنها ألفا وبيتاوغاما والأشعة السينية والأشعة فوق البنفسجية.

مشروع مانهاتن Manhattan Project :

في عام 1934 اكتشف عالم ألماني أن انشطار ذرة اليورانيوم يحدث بسرعة، ويولدكمية هائلة من الطاقة ، ويمكن أن يحدث إنفجاراً هائلاً . أخذ الألمان بتطوير هذه الفكرة والإستفادة منها في تصنيع القنبلة النووية ، لم يسترعذلك اهتمام أحد إلى أن قامت المانيا بإيقاف تصدير اليورانيوم من مناجم تشيكوسلوفاكيا المحتلة من قبل الألمان.

في الثاني من آب أغسطس 1939، وقبل بدء الحرب العالمية الثانية، قام البرت اينشتاين Albert Einsteinبكتابة رسالة إلى الرئيس الأمريكي فرانكلين روزفلت Franklin D Roosevelt .واصفاً فيها الطاقة الهائلة التي تنتج عن الإنشطار النووي ، ومعبراً فيها وزملاءه عن قلقهم الشديد من إمكانية تحويل المانيا النازية للإنشطار النووي إلى قنبلة نووية.

اينشتاين عالم الماني المولد ، يهودي الديانة ، تركأوروبا قبل استلام هتلر للسلطة في المانيا ، عارض اينشتاين استغلال الطاقة النووية لتصنيع الأسلحة، وكان يخشى على العالم من امتلاك المانيا لهذه التقنية قبل الولايات المتحدة الأمريكية.

عقد قادة الجيشالأمريكي العزم على امتلاك هذه التقنية مهما كلف الأمر، فأخذوا يبحثون عنبناء يصلح كمختبر لإنتاج القنبلة النووية ، بحيث يبعد الموقع (200) ميل علىالأقل عن الحدود البحرية والدولية ، ويجب أن يبعد كثيراً عن التجمعات السكانية ، لأن أي خطأ قد يكلفهم الكثير من الخسائر البشرية.

استقررأيهم على مدرسة للأولاد في أرض صحراوية في ولاية نيومكسيكو في منطقة تعرف بإسم Jornada del Muerto وتعني رحلة إلى الموت، وتم تعيين روبرتأوبنهايمر على رأس فريق من العلماء في مشروع عرف بإسم مشروع مانهاتن السري Manhattan Project .وأخرجت بذلك الى الوجود أول قنبلة نووية أسقطت علىاليابان في السادس من أب / أغسطس عام 1945.

الفصل السابع عشر

الكيمياء النووية وفروعها

الكيمياء الاشعاعية Radiochemistry:

وهي فرع من فروع العلوم النووية التي تشمل الفيزياء النووية والتكنلوجيا النووية والكيمياء النووية والكيمياء الاشعاعية وتتداخل الكيمياء النووية مع الكيمياء الاشعاعية في مواضيعهما حيث تهتمان بدراسة العناصر المشعة وعمليات الانحلال الاشعاعي ونتائجه وتدرسان كيفية الوقايه من الاشعاع ووسائل الكشف عنه كما تدرسان كيفية استخدام هذا الاشعاع للاغراض الحياتيه المختلفه (الطبيه والزراعيه والصناعيه والغذائيه والاستكشافيه) كما تهتم بدراسة نوى الذرات ومكوناتها والعلاقه فيما بينها والطاقه المتحرره منها وتدرس التفاعلات النوويه التي تحدث نتيجة قصف النوى باشعاع معين وتدرس استخدام الطاقه النوويه لانتاج الكهرباء .

الدقائق النووية الاساسيه Principle Nuclear Particales :

يوجد في النواة دقائق عديده وصلت المعروفه منها 150 دقيقه ولا يعرف عنها إلا الشئ القليل ويمكن تصنيفها حسب كتلتها إلى :

الدقائق الخفيفه leptons : وهي الالكترون والنيترينو الذي يرمز له **υ** كتلته صفر وشحنته صفر لذلك فهو جسيم طاقي.

الدقائق المتوسطه mesons : وتتراوح كتلتها من 280 – 1000 مره اكبر من كتلة الالكترون ونها البيوتونات–π , 0 π , + π والكاوونات K

الدقائق الثقيله baryons : ومنها البروتونات والنيوترونات.

القوى النووية Nuclear Forces :

تعتبر هذه القوى اشد القوى وتظهر كقوى جذب بين مكونات النواة مثلا n-n , p-n , p-p

أن هذه القوى قصيرة المدى حيث لايتجاوز مداها 12-10 سم أي بحدود نصف قطر النواة , ان القوى النوويه تسببها جسيمات صغيره تسمى الميزونات وهذه الجسيمات موجوده في الطبيعه وان التجاذب بين النويات يحصل بواسطة تيار مستمر من الميزونات بين النويدتين .

الاصناف النووية Nuclear Species :

وهي عناصرلها عدد معين من البروتونات وعدد معين من النيوترونات أي عدد كتله معين واصطلح ان يكتب عدد الكتله على الجهه العليا اليسرى من رمز العنصر وقد يكتب العدد الذري اسفله مثال ذلك :

$^{59}_{27}Co$, $^{60}_{27}Co$, $^{4}_{2}He$, $^{238}_{92}U$

تقسم الاصناف النوويه الى أربعة أصناف وهي :

النظائر Isotops : وهي الاصناف النوويه التي تتساوى في اعدادها الذريه Z وتختلف في اعدادها الكتليه A أي انها تحتوي على اعداد مختلفه من النيوترونات n مثال على ذلك نظيري الكوبالت اعلاه وتقسم النظائر حسب نشاطها الاشعاعي الى :

A : النظائر المستقره : وهي النظائر غير المشعه حيث ان نويداتها ثابته حيث على الاغلب تحتوي على عدد زوجي من البروتونات والنيوترونات . توجد حوالي 275 نواة مختلفه لاتظهر نشاطا اشعاعيا منها 60 % تمتلك عدد زوجي من n و p ومنها 40% تمتلك عدد زوجي من n وفردي من p أو العكس وتوجد فقط ستة نوى مستقره تمتلك عدد فردي من n وعدد فردي من p وهي : $^{2}_{1}H$, $^{6}_{3}Li$, $^{10}_{5}B$, $^{14}_{7}N$, $^{50}_{23}V$, $^{180}_{73}Ta$

B : النظائر غير المستقره : وهذه النظائر مشعه حيث ان نويداتها غير مستقره تتحول الى نويدات مستقره وذلك ببعثها اشعاعات مختلفه ناتجه عن تفاعلات نوويه فيما بين النويدات النوويه وهذه العمليه تسمى بالنشاط الاشعاعي واغلبها تحتوي علىاعداد منفرده من البروتونات والنيوترونات .

Isobars : وهي النويدات التي تحتوي على اعداد ذريه مختلفه واعداد كتله متساويه

مثل : $^{130}_{56}Ba$, $^{130}_{54}Xe$, $^{130}_{52}Te$

Isotons : وهي النويدات التي تحتوي على اعداد متساويه من النيوترونات واعداد كتله مختلفه مثل :

$^{32}_{16}S$, $^{31}_{15}p$, $^{30}_{14}Si$

Isomers : وهي نويدات لها نفس العدد الذري والعدد الكتلي ولكنهما يختلفان بالخصائص الاشعاعيه كشكل الانحلال وطاقته وعمر النصف وغالبا مايكون احدهما مشع والآخر مستقر مثلا : ^{60m}Co , ^{60g}Co حيث يرمز للنويده المستقره g وتعني ground state وللنويده المشعه m وتعني metastable

التفاعل النووي والتفاعل الكيمياوي:

التفاعل النووي	التفاعل الكيمياوي
ذرات عنصر واحد معين تتحول الى ذرات عنصر آخر.	ماده واحده تتحول الى ماده أخرى ولكن لاتتغير هوية الذرات.
البروتونات والنيوترونات ودقائق اخرى تشارك في التفاعل, في حين ان الالكترونات المداريه نادرا ماتشترك في التفاعل.	الالكترونات المداريه هي التي تشترك في التفاعل حيث تتكسر اواصر وتتكون اواصر غيرها وان الدقائق النوويه لاتشترك في التفاعل.
التفاعل يصاحبه تغير كبير في الطاقه وتغيرات ممكن حسابها في الكتله.	التفاعل يصاحبه تغير طفيف في الطاقه بدون تغير في الكتله.
سرعة التفاعل تتاثر بعدد النوى ولاتتاثربدرجة الحراره أو العوامل المساعده او نوع المركب المتواجد فيه العنصر المشع.	سرعة التفاعل تتأثر بدرجة الحراره والتركيز والعوامل المساعده ونوع المركب المتواجد فيه العنصر.

الاشعاع :

ماهو الاشعاع ؟ الاشعاع من وجهة النظر الفيزياويه هو حاله فيزياويه تتواجد فيها أمواج كهرومغناطيسيه أو جسيمات تمتلك صفه موجيه لها طاقه معينه في بداية تكونه وطاقه أخرى في نهاية تكونه وينتهي الاشعاع عندما تصبح طاقته صفر.

تصنيف الاشعاع :

1- الاشعاع الموجي :

A: الاشعاع المؤين : مثل اشعة γ واشعة X

B: الاشعاع غير المؤين : مثل الضوء العادي (المرئي) .Visb , الاشعه الفوق بنفسجيه U.V. , الاشعه تحت الحمراء .I.R , الليزر

2- الاشعاع الجسيمي (كله مؤين) :

A : جسيمات مشحونه : مثل α, β , p

B: جسيمات غير مشحونه :مثل n

تعتمد قابلية الاشعاع على التأين على مقدار طاقته والتي تحدد بالمقدار $h\upsilon$ التأين : هو عملية ازاحة احد الكترونات الذره وينتج عنها مايعرف بالزوج الآيوني (ion pair) وفي التفاعلات النوويه يحصل نوعين من التاين.

التأين المباشر : وهو تكوين الازواج الآيونيه مباشرة عند قصف الذره بدقيقه مشحونه لها طاقهكافيه لاحداث عملية التأين او تقصف بفوتونات ذات طاقه عاليه كافيه لاحداث عملية التأين.

التأين غير المباشر : وهو تكوين الازواج الآيونيه بصوره غير مباشره ويحدث عند قصف الذره بجسيمات غير مشحونه مثل النيوترونات حيث تتولد نتيجة ذلك جسيمات مشحونه تقوم بانجاز عملية التأين.

ملاحظه : الاشعه التي طاقتها تتراوح مابين 100 – 1000 الكترون فولت تعتبر اشعه مؤينه.

حساب طاقة الاشعه:

تحسب طاقة الاشعه بوحدات الجول أوالالكترون فولت ووحدة ال ev في الكيمياء الاشعاعيه هي التي تستخدم .

ev : هو مقدار الطاقه المتحرره عند مرور شحنه مقدارها الكترون واحد بين نقطتين فرق الجهد بينهما فولت واحد أي ان.

الطاقه بوحدة ev = شحنة الالكترون * 1 فولت.

وبما ان الفولت هو الشغل المصروف لنقل وحدة الشحنه.

(الفولت = جول / كولوم)

ev = 1.6 * 10-19 coul J / coul

ev = 1.6 * 10-19 J

العلاقه بين الطاقه بوحدة ev والطول الموجي للاشعاع بوحدة الانكستروم

$E = h\upsilon = h c / \lambda$

E = 6.63 * 10-34 J s * 3* 108 m s-1 / λ A0

$1m = 1010\ A0$

$1ev = 1.6 * 10\text{-}19\ J$

$Eev = 12400 / \lambda(A0)$

الاشعاع الموجي : عباره عن امواج تتكون من مجالين متعامدين أحدهما كهربائي والاخر مغناطيسي وكلاهما عمودي على اتجاه سير الموجه ولهما طور واحد لذلك فالموجه تكون مستعرضه ذات ثلاثة ابعاد.

خواص الموجه الكهرومغناطيسيه:

سرعتها في الفراغ تساوي 3* 810 م / ثا.

المجالان الكهربائي والمغناطيسي الذان يكوناها عموديان على بعضهما ولهما طور واحد.

طاقة الموجه تتوزع بين المجالين بالتساوي.

تختلف الامواج الكهرومغناطيسيه فيما بينها نتيجة اختلافها بالطاقه.

يمكن ان تفقد الموجه طاقتها او تتحول طاقتها الى شكل اخر عند اصطدامها بالماده.

انواع الاشعه الموجيه:

الاشعه السينيه X-RAY :

يتراوح طولها الموجي 1 – 100 انكستروم وهي على نوعين :

الاشعه السينيه المميزه .

الاشعه السينيه ذات الطيف المستمر.

الاشعه السينيه المميزه :ان الميكانيكيه العامه لتوليدها تتضمن خلع الكترون من مدارات الذرة الداخليه يتبعه املاء الفجوه التي تركها بالكترون من مدار اعلى واثناء عملية الانتقال لهذا الالكترون يبعث اشعه سينيه ممزه تميز كلا من المدار والذره الباعثه .

طرق توليد الاشعه السينيه المميزه:

التأثير الكهروضوئي : حيث يتم قصف ذره معينه بأشعة كاما او أشعة اكس المتفلوره ونتيجه لهذا القصف تحدث الميكانيكيه اعلاه .

قصف الذره بأشعه جسيميه ذات طاقه عاليه مثل سيل من الالكترونات او البروتونات اودقائق الفا تؤدي الى حدوث الميكانيكيه اعلاه

اثناء عملية التحول الداخلي حيث تحدث هذه العمليه للنويدات التي تشع اشعة كاما حيث ان هذه الاشعه عند امتصاصها من قبل احد الالكترونات المداريه القريبه من النواة فسوف يقذف هذا الالكترون وتحدث الميكانيكيه اعلاه.

الأسر الالكتروني : حيث تأسر نواة عنصر معين احد الكتروني الغلاف K القريب منها وتحدث الميكانيكيه اعلاه.

الاشعه السينيه ذات الطيف المستمر : تسمى هذه الاشعه البرمشتالنك وهي كلمه المانيه تعني الكبح أو الابطاء للاشعه . فعند مرور الالكترونات المعجله في المجال الكهربائي للنواة الهدف تبدأ بالتباطؤ السريع نتيجه لتنافرها مع الكترونات الذره الهدف وهذا التنافر يؤدي الى انحراف مسارها, التباطؤ والانحراف يؤدي الى فقدان هذه الالكترونات جزء من طاقتها والتي يظهر على شكل اشعه سينيه ذات طيف مستمر وكلما ازداد العدد الذري للذره الهدف ازدادت شدة الاشعه المنبعثه

أشعة كاما γ : تنطلق اشعة كاما من المصادر المشعه الطبيعيه أو الصناعيه اثناء عملية الانحلال الاشعاعي حيث ان النواة المتهيجه تعود الى حالة الاستقرار عند فقدانها للطاقه على شكل اشعة كاما , ان اهم مصدر معروف لاشعة كاما هو الكوبالت – 60

$$^{60}_{27}Co \rightarrow \beta(0.31ev) + Co^{*}(2.5Mev) \rightarrow \gamma(1.17Mev) + Co^{*}(1.33Mev) \rightarrow \gamma(1.33Mev) + ^{60}_{28}Ni$$

حيث انه اثناء عملية انحلال النيكاترون له (تبعث نواته -β بطاقه تساوي 0.31 الكترون فولت) تبقى نواته متهيجه وتحمل طاقه مقدارها 2.5 Mev حيث تتخلص هذه النواة من الطاقه هذه بمرحلتين : الاولى انبعاث كاما بطاقه مقدارها 1.17 Mev والمرحله الثانيه انبعاث كاما بطاقه مقدارها 1.33 Mev والنتيجه الحصول على الوليده النيكل – 60

مقارنه بين اشعة اكس واشعة كاما :

اشعة اكس	اشعة كاما
تنبعث عندما تعاني الالكترونات المداريه تغيرا في موقعها بين المدارات . طيفها قد يكون مستمرا او احديا. طيفها صفه مميزه للذرات. لايمكن تمييز النظائر المختلفه بواسطة طيفها.	منشئها من نواة الذره حيث تنتج من التغيرات التي تحصل في النواة. طيفها مستمرا. طيفها صفه مميزه للنواة . يمكن ان يستخدم طيفها للتمييز بين النظائر المختلفه .

س : ماسبب انبعاث اشعة كاما ؟

الاشعاع الجسيمي:

جسيمات α : وهي عباره عن نواة ذرة الهيليوم (بروتونين ونيوترونين) تحمل دقائق الفا شحنه موجبه ثنائيه وكتلتها 4.002603 وحدة كتله ذريه وعند انبعاثها فان العدد الكتلي للام يقل بمقدار 4 وعددها الذري يقل بمقدار 2 , ونظرا للكتله الكبيره لها فانها تحتاج الى طاقه كبيره جدا لكي تتحرك بسرعه تقارب سرعة الضوء وعند هذه السرع تعتبر اشعاع جسيمي ويمكن تطبيق معادلة بلانك عليها وعندما تكون سرعتها قليله فانها تعد جسيما غير نسبي وتطبق عليها القوانين الكلاسيكيه لحركة الجسيم , ان المصدر الطبيعي لدقائق الفا هو انحلال اليورانيوم – 238 الى الثوريوم – 234 ,

ان مدى الفا قصير لذلك فان الورقه العاديه تكفي لايقافها وذلك لكتلتها الكبيره التي تجعلها تسير ببطئ مما يزيد من احتمالية تفاعلها مع الماده الماره خلالها مما يؤدي الى فقدانها لطاقتها وتوقفها كما ان التأين الذي تحدثه في المادة كبير بسبب شحنتها العاليه وسرعتها البطيئه التي تساعد على ذلك بشكل كبير.

العلاقه بين طاقة الفا وطاقة الوليده وQ للتفاعل :

$$^{A}X \rightarrow {}^{A-4}y + \alpha + Q$$

$$Q = E_{\alpha} + E_{y}$$

$$Q = 1/2 M_{\alpha} V_{\alpha}^{2} + 1/2 M_{y} V_{Y}^{2}$$

$$M_{Y} V_{Y} = M_{\alpha} V_{\alpha}$$

$$V_{Y} = M_{\alpha} V_{\alpha} / M_{Y}$$

$$Q = 1/2 M_{\alpha} V_{\alpha}^{2} + 1/2 M_{Y} \times M_{\alpha}^{2} V_{\alpha}^{2} / M_{Y}^{2}$$

$$Q = 1/2 M_{\alpha} V_{\alpha}^{2} (1 + M_{\alpha} / M_{Y})$$

$$M_{\alpha} / M_{Y} = 4 / A - 4$$

$$Q = E_{\alpha} (1 + 4 / A - 4)$$

$$Q = E_{\alpha} (A - 4 + 4 / A - 4)$$

$$Q = E_{\alpha} (A / A - 4)$$

$$E_{\alpha} = Q(A - 4) / A$$

س : احسب الطاقه الحركيه لجسيم الفا المنبعث من انحلال 212Po والطاقه الحركيه للوليده المرتده 208Pb ؟

العلاقه بين طاقة الفا ومداها :

ان مقدار طاقة الفا الناتجه من التفاعلات النوويهتتراوح بين 4-9 Mev ان مدى جسيمات الفا قصير جدا ويحسب كالاتي :

$$R_{\alpha(air)} = 0.4 \times E_{\alpha}^{\frac{1}{3}}$$

$$R_{\alpha(z)} = 0.173 \times E_{\alpha}^{\frac{3}{2}} \times A_{Z}^{\frac{1}{3}}$$

يقاسR بوحدة مغم / سم2 , A الوزن الذري للماده يقاس بالغرام يجب ان يحول الى مغم , E يجب ان تقاس بوحدة مغم . سم2 / ثا2 ويتم التحويل كالاتي :

E بوحدة ev تحول الى الجول (كغم . م2 / ثا2) وهذه تحول الى مغم . سم2 / ثا2.

ومن مدى الفا يمكن حساب سمك الاختراق d لها $R\alpha(z)=d\rho(z)$

حيث ان ρ كثافة الماده التي تمر خلالها الفا .

س : احسب سمك اختراق الفا طاقتها 8.78 Mev عند قصفها لوح من الالمنيوم كثافته 5.9 غم / سم2 ووزنه الذري 26.98154 ؟

س : احسب مدى الفا في الهواء عند انبعاثها من انحلال البولونيوم – 212 اذا علمت ان الكتل الذريه للبولونيوم 211.98886 وللوليده 207.97665 وللالفا 4.002603 ؟

الفصل الثامن عشر

الكيمياء النووية ومجالاتها

هو أحد فروع الكيمياء الذي تتعامل مع الفعالية الإشعاعية radioactivity، والعمليات النووية والخواص النووية، أي أنه يمكن من خلالها تحويل الرصاص إلى ذهب ، أو تحويل ذرة إلى ذرة عنصر أخرى كما انها من الأشياء الخطيرة جدا علي الصحة الآدمية لما لها من أضرار على الإنسان والكائنات الحيه الأخرى من الأمراض السرطانية وتشويه الاجنة في الأرحام ولقد حذرت منظمة الصحة العالمية من هذه الأضرار في مؤتمرات عدة.

ويمكن تقسيمها إلى التصنيفات التالية :

كيمياء إشعاعية.(Radiochemistry)

كيمياء النظائر.(Isotopic chemistry)

رنين نووي مغناطيسي.(Nuclear magnetic resonance)

ومن الدول المتقدمة في هذا المجال هم : الولايات المتحدة المملكة المتحدة روسيا.

وفي ما يلي تفصيل لك قسم من اقسام الكيمياء النووية:

الكيمياء الإشعاعية (بالإنجليزيRadiochemistry) :

مجال كيميائي يعنى بدراسة العناصر المشعة. كما يعالج إنتاج وتعريف واستخدام مثل تلك العناصر ونظائرها. وقد أفادت الكيمياء الإشعاعية، علم الأثار

وعلم الكيمياء الحيوية والمجالات العلمية الأخرى. وتستخدم التقنيات الإشعاعية الكيميائية في الغالب في مجال الطب للمساعدة في تشخيص المرض، وفي العديد من الدراسات البيئية.

تدرس الكيمياء الإشعاعية جميع أنواع الإشعاعات, سواءَ كانت طبيعية أو كانت مصنوعة من قبل الإنسان.

أنماط الإضمحلال الرئيسية :

أنماط الإضمحلال الرئيسية إن جميع النظائر المشعة هي نظائر غير مستقرة لجميع العناصر-و ذلك يخضع للإضمحلال النووي مما يؤدي إلى انبعاث بعض الأنواع من الإشعاعات. قد تكون تلك الإشعاعات المنبعثة واحدة من ثلاث أنواع, إما أن تكون ألفا أو بيتا أو أشعة غاما.

α إشعاع (ألفا) - هي انبعاث لجسيمات ألفا (التي تحتوي على 2 من البروتونات و2 من النيوترونات) من النواة الذرية. و عندما يحصل هذا, فأن الكتلة الذرية الخاصة بالذرة ستنقص 4 وحدات كما تنقص العدد الذري بمعدل وحدتين.

β إشعاع (بيتا) - وهي تحول النيوترون إلى إلكترون و بروتون. بعد حدوث هذه العملية , تنبعث الإلكترون من النواة إلى الغيمة الإكترونية. electron cloud

إشعاع غاما - هي انبعاث للطاقة الكهرومغناطيسية (إشعة أكس على سبيل المثال) من نواة الذرة. و يحدث هذا عادةً خلال الإضمحلال الإشعاعي radioactive decay لألفا وبيتا.

يمكن أن تُميّز هذه الثلاثة أنواع من الإشعاعات عن بعضها على حسب قوة اختراقها للأجسام.

فيمكن إيقاف جسيم ألفا بسهولة كبير وذلك عندما تنطلق لعدة سنتيمترات في الهواء أو بإيقافها بواسطة قطعة ورقية، هذا الجسيم هو نظير نواة الهيليوم. أما الجسيم بيتا فيمكن أيقافه بواسطة ورقة من الألمنيوم تكون سمكها فقط عدة مليمترات، و هذا الجسيم هي عبارة عن ألكترون. غاما هي أكثر الإشعاعات قوةً في اختراق الأجسام و هي فوتون ذات طاقة عالية و بدون شحنة و بدون كتلة. تحتاج أشعة غاما إلى كمية محددة من المعدن الثقيل للوقاية من أشعاعها (وعادةً ما تكون معتدة على الرصاص أو على الباريوم) للتقليل من حدة ضررها.

التحليل التنشيطي:

عند إطلاق أشعة من النيوترونات خارج الأجسام فأن هذا قد يؤدي إلى نشاطاً إشعاعياً; هذا النوع من التنشيطات للنظائر المستقرة لصنع نظير مشع هو أساس تحليل التنشيط النيوتروني neutron activation analysis.

واحدة من أكثر المواضيع إثارةً التي تمت دراستها بهذه الطريقة هي دراسة شعر رأس نابليون, التي تمت فحصها و دراستها بسبب محتواها الزرنيخي.

توجد سلسلة من الطرق التجريبية المختلفة, صممت لتمكين قياس نطاق العناصر المختلفة في المصفوفات المختلفة. و لقيام بحث تأثير أحد المصفوفات فمن الشائع استعمال الإستخراج الكيميائي للعنصر المطلوب و/أو بسماح للنشاط الإشعاعي الناتج من العنصر المصفوفي بالإضمحلال قبل قياس نشاطها الإشعاعي. بما أن تأثير المصفوفة يمكن أن تُصحح بمراقبة طيف الإضمحلال, فأن هذا سيتطلب تحضير القليل من العينة و ذلك لبعض الأنواع من العينات, مما يجعل من تحليل التنشيط النيوتروني أقل عرضة للتلويث.

يمكن أن تُرى التأثيرات الناجمة عن سلسلة مختلفة من أوقات التبريد إذا تعرضت العينة الافتراضية التي تحتوي على الصوديوم, و اليورانيوم و الكوبالت في نسبة 100:10:1 لنبضة قصيرة جداً من النيوترونات الحرارية. و بذلك ستسيطر نشاط Na 24 على النشاط الإشعاعي البدئي, لكن مع مرور الوقت ستسود عليها نشاط Np 239و نشاط Co .60

نظائر العناصر الكيميائية:

هي أشكال من العنصر الكيميائي لذرتها نفس العدد الذري Z، ولكنها تختلف في الكتلة الذرية وكلمة نظير، تعنى نفس المكان.

عند تطبيق عملية التسمية العلمية فإن النظير (النويدة ((Nuclide) محدد بإسم العنصر متبوعا بشرطة ثم عدد النوكلونات (البروتونات والنيوترونات) الموجودة في نواة الذرة (مثال ، هيليوم-3 . كربون-12 ، كربون-14 ، حديد-57 ، يورانيوم-238) . وعند استخدام الإختصارات فإنه يتم وضع رقم النوكلونات أعلى رمز العنصر .

(He, 12C, 14C, 57Fe, 238U)3

اختلاف الخواص بين النظائر:

في النواة المتعادلة،عدد الإلكترونات يساوى عدد البروتونات. وعلى هذا فإن النظائر المختلفة يكون لها نفس عدد الإلكترونات ونفس الشكل الإلكتروني. ونظرا لأن تصرف الذرة كيميائيا يتم تحديده بالتركيب الإلكتروني، فإن النظائر تقريبا تسلك نفس السلوك الكيميائي. الإستثناء الأساسي أنه نظرا لوجود اختلاف في كتلتها ، فإن النظائر الثقيلة تميل لأن تتفاعل بصورة أبطأ من النظائر الأخف لنفس العنصر . (تسمى هذه الظاهرة تأثير حركة النظائر)

ويلاحظ تأثير الكتلة بشدة عند النظر للبروتيوم (H1) مقابل ديتيريوم (H,2) نظرا لأن الديتريوم له ضعف كتلة البروتيوم . أما بالنسبة للعناصر الأثقل فإن تأثير الكتلة النسبي بين النظائر يقل ويكاد ينعدم كلما زاد ثقل العنصر.

وبالمثل ، فإنه لجزيئين يختلفان فقط في طبيعة النظير المكون لكل "متناظرين" منهما سيكون لهما تقريبا نفس نفس التركيب الإلكتروني ، وعلى هذا سيكون لهما خواص فيزيائية وكيميائية متشابهه . الأشكال الإهتزازية للجزيء يتم تحديدها بشكل الجزيء وكتلة الذرات المكونة له . وبالتالى فإن هذين المتناظرين سيكون لهما شكلان إهتزازيان مختلفان. حيث ان الشكل الإهتزازي يسمح للجزيء بإمتصاص الفوتونات الملائمة لطاقة هذا الإهتزاز، ويتبع ذلك أن يكون للمتناظرين خواص ضوئية مختلفة في المنطقة تحت الحمراء.

وبالرغم من أن النظائر لها تقريبا نفس الخواص الإلكترونية والكيميائية ، فإن سلوكها الجزيئي مختلف تماما . تتكون النواة الذرية من بروتونات ونيترونات مرتبطة معا بقوى نووية قوية . ونظرا لأن البروتونات لها شحنة موجبة ، فإنها تدفع بعضها البعض . وتقوم النيوترونات بعمل بعض الفصل بين الشحنات الموجبة ، مما يقلل من التنافر الكهرستاتيكي ، وتساعد على ثبات النواة . وبزيادة عدد البروتونات ، تزداد الحاجة لنيوترونات أكثر لعمل ثبات للنواة .

فمثلا ، على الرغم من أن نسبة نيوترون / بروتون في He 3هي 1 / 2 ، فإن نيوترون / بروتون في U238 أكبر وتصل إلى 3 / 2 . وفى حالة وجود نيوترونات أقل أو أكثر من المفترض ، فإن النواة تكون غير مستقرة ، وينتج الإضمحلال النووي.

التواجد في الطبيعة يمكن لعدة نظائر لنفس العنصر أن تتواجد في الطبيعة.ونسبة التواجد لنظير تتناسب بشدة مع ميله ناحية الإضمحلال النووي، النيوكليدات التي تعيش لفترة قصيرة تضمحل سريعا ، بينما تعيش مكوناتها. وهذا لا يعنى أن هذه الأصناف تختفى تماما ، نظرا لأن كثير منها يتكون أثناء إضمحلال الأصناف ذات العمر الأطول. يتم حساب الكتل الذرية للعناصر بعمل متوسط للنظائر التي لها كتل مختلفة وبالتوافق مع علم الكون، فإن كل النويدات ما عدا نظائر الهيدروجين والهيليوم نتجت من النجوم والسوبرنوفا. ويكون تواجدها الطبيعي ناتجا من الكميات الناتجة أثناء تلك العمليات الكونية، وأيضا توزيعها في المجرة، ومعدلات إضمحلالها . وبعد الإندماج المبدئي للنظام الشمسي ، توزعت النظائر طبقا لكتلها .شاهد أصل النظام الشمسي. يختلف تركيب نظائر العناصر على كل كوكب ، مما يجعل من الممكن تحديد أصل النيازك.

تطبيقات النظائر:

وكما قال العالم الفرونكو زينوميك و كادار الفونسو بيراز في مأدبة عشاء في ألمانيا فان هناك كثيرا من التطبيقات التي يتم استخدام الخواص المختلفة للنظائر فيها وكذلك هناك عدة إحتمالات فبالتالي هناك عدة نظائر لأي عنصر مهما كان وذلك الإختلاف يكون في عدد النيوترونات.

استخدام الخواص النووية:

تعتمد كثير من تقنيات المطياف على الخواص النووية المتفردة للنظائر . فمثلا" مطياف الرنين النووي المغناطيسي"NMR " يتم استخدامه فقط للنظائر التي لها قيمة دوران غير صفرية . وأكثر النظائر استخداما مع مطياف رنين نووي مغناطيسي 1 H، 2D، 13C، . 31P:

مطياف موس باوير يعتمد أيضا على الإنتقالات النووية لنظائر معينة مثل 57. Fe.

كما أن النيوكليدات الإشعاعية لها استخدامات مهمة.نظرا لأن تطوير كل من القوة النووية والأسلحة النووية تتطلب كميات كبيرة من النظائر. كما أن فصل النظائر تمثل تحدي تقني معقد.

رنين نووي مغناطيسي.

رنين نووي مغناطيسي الرنين النووي المغناطيسي Nuclear magnetic resonance أو اختصارا (إن.إم.آر NMR) هي إحدى الظواهر الفيزيائية التي تعتمد على الخواص المغناطيسية الميكانيكية الكمومية لنواة الذرة. الرنين النووي المغناطيسي أيضا يستخدم للدلالة على مجموعة منهجيات و تقنيات علمية تستخدم هذه الظاهرة لدراسة الجزيئات من بنية و تشكيل فراغي.

تعتد الظاهرة أساسا على ان جميع النوى الذرية التي تملك عددا فرديا من البروتونات أو النيوترونات يكون لها عزم مغناطيسي أصلي intrinsic وعزم زاوي angular momentum. أكثر النوى التي تستخدم في هذه التقنيات هي هيدروجين-1 أكثر نظائر الهدروجين توافرا في الطبيعة إضافة إلى الكربون-13 نظير الكربون الطبيعي . نظائر عناصر أخرى يمكن أن تستخدم لكن استخداماتها تبقى أقل.

علم الكيمياء النووية

نشأته وتطوره

ماهى الكيمياء ؟

الكيمياء فرع من فروع العلم يختص بدراسة تركيب المواد والتفاعلات التى تحدث بينها وهذا العلم قد تفرع بدوره الى أفرع عديدة منها من أختص بالمواد غير العضويةكالفلزات وغيرها ومنها من أختص بالمواد العضوية مثل السكريات وغيرها

ومع تطور علوم التشريح ووظائف الاعضاء فتح ذ لك مجالاً واسعاً لدراسة العملياتالحيوية التى تجرى داخل الجسم فيما يسمى (بالكيمياء الحيوية) التي تختصبدراسة كيمياء الكائنات الحية ، حيث تبحث في تركيب مادتها ، وفي معرفةالنظم الحيوية التي يتكون منها جسم الكائن الحي والتغيرات التي تحدث لهدهالنظم الدقيقة مادام الكائن على قيد الحياة فتنير الطريق للتقدم فيالميادين النختلفة سواء من ناحية التغذية أو النواحي الصحية أو الإستفادة من الموارد الطبيعية سواء نباتية أو حيوانية ، والأهم من ذلك التدبر في خلقالكائن الحي وما وضعه فيه الخالق جل شأنه من نظام دقيق يبين عظمة الخالقوإعجازه في خلقه.

علم الكيمياء وأهميته وتعريفه:

تعريف علم الكيمياء:

كما تعرف أن علم الكيمياء يتعامل مع المواد التي تتكون من عناصر ومركبات وكلهذا المواد لها تركيب وخواص وتفاعلات وتحولات، وتصاحب التفاعلات طاقة ، فنستنتج مما سبق أن علم الكيمياء هو: علم يهتم بدراسة تركيب المادة والتغيرات التي تحدث لها والطاقة المصاحبة لهذه التغيرات.

أهمية علم الكيمياء:

يدخل علم الكيمياء في جميع نشاطات الكائنات الحية ويسهم في كافة مناشط الحياة بواسطة علم الكيمياء تم تحويل المواد الطبيعية الخام إلى مواد تلبي احتياجاتالإنسان، فاستطاع الكيميائي أن ينتج من الفحم والنفط بعض المواد الجديدة كالأصباغ والعقاقير والعطور واللدائن (البلاستيك) والمطاط الصناعي.

ساهمت الكيمياء في المجال الزراعي بواسطة الأسمدة الكيميائية والمبيدات الحشرية أمكن بواسطة علم الكيمياء إنتاج الألياف الصناعية فساهمت في مجال الكساءوالمنسوجات وغير ذلك من المجالات الكثيرة التي تساهم بها الكيمياء طبيعة علم الكيمياء والطريقة العلمية في التفكير الكيميائي يلاحظ الأشياء ويحاولأن يجيب عن التساؤلات حولها مثل : ما سبب الطعم الحلو للسكر ، لماذا وكيف يصدأ الحديد؟ فهنا قد لاحظ ثم يبدأ بالبحث عن جواب لهذه الملاحظات والتساؤلات ، ولكي يجيب فعليه أن يجرب ويعتمد على التجربة ، لأن علمالكيمياء أكثر العلوم اعتماداً على التجربة وذلك لسببين هما الكيميائي يتعامل مع موجودات لايراها ولا يستطيع إحصاءها مثل الذرات والجزيئات.

القوانين العامة في الكيمياء قابلة للتغير والتعديل:

فهناقد جـرب ومع التجريب تتم عملية تدوين المعلومات عن النتائج التي شاهدها من التجربة ، وبعدها يبدأ بتفسير ما شاهده بوضع الفرضيات ، والفرضية هي: فكرة تنبع من خيال العالم ترتبط بالحقائق والوقائع التي جرت حولها الملاحظات والتجارب فإذا كانت هذه الفرضية صحيحة وتم إختبارها بعدة تجارب لإثبات صحتها وأصبحت النتيجة إيجابية تصبح قانوناً عاماً ، وبعد التفسير تأتي مرحلة نشر النتائج لتعم الفائدة على الجميع.

والآن نستطيع ترتيب الخطوات العلمية في التفكير كما يلي:

الملاحظة.

التجريب.

تدوين المعلومات.

التفسير.

النشر.

المراحل التي مر بها علم الكيمياء.

مرحلة علم الصنعة:

والتي ظهرت فيها خرافة تحويل المعادن الرخيصة إلى معادن ثمينة مرحلة الكيمياء التي اتجهت إلى الطب: ففي هذه المرحلة تم تحضير العقاقير لشفاء المرضى وقد برز العلماء العرب في ذلك من مثل جابر بن حيانوابن سينا والرازي.

مرحلة نظرية فلوجستون:

التي بدأت في النصف الثاني منالقرن السابع عشر والتي تقول أن الفلوجستون عنصر يساعد المادة على الإشتعالويتحد معها مكوناً أكسيد المادة وأسموه (كالكس) : معدن + فلوجستون<---- كالكس وقد بقيت النظرية سائدة حتى أتى العالم الفرنسي لافوازيه عام 1778م وأثبت خطأ هذه النظرية عندما سخن الزئبق وبرهن أن عملية الإحتراق عبارة عن اتحاد أكسجين الهواء بالمادة (تأكسد) وليس كما قالت نظرية فلوجستون.

المرحلة الرابعة والأخيرة هي علم الكيمياء الحديثة التي بدأت في أواخر القرن الثامن عشر.

دور العلماء المسلمين

في تطوير علم الكيمياء

جابر بن حيان - أبو الكيمياء:

هوجابر بن حيان بن عبدالله ، ولد في عام 102 هجرية (720 ميلادية) وذلك فيقرية طوس في الشمال الشرقي من إيران والتي تبعد 28 كيلومتراً عن مدينة مشهد، وكان أبوه يعيش قبل رحيله إلى طوس في مدينة طرطوس السورية حيث كان يعمل عطاراً عكف جابر على دراسة علوم الطبيعيات والرياضيات ، ثم رحل إلىالكوفة حيث التقى بالإمام جعفر الصادق - عليه السلام - الذي كان عالماً في الكيمياء والدين أيضاً والذي حدثه عن علم الكيمياء عند اليونان والمصريينوالفرس والهنود والصينيين.

أنشأ لنفسه معملاً في بيته بالكوفة اختبرفيه بنفسه كل ما قاله القدماء من تجارب الكيمياء ليعرف مدى صحتها ، وكلما وجد نفسه بحاجة إلى جهاز جديد أو آله ، صنع مايحتاجه بيديه حيث كان بالمعمل بيت للنار ، وفي ليلة واحدة سجل جابر أول كشفين له هما الماء الملكي وماءالذهب المستخدم حتى يومنا هذا في طلاء الأوراق والأخشاب.

هو صاحب نظرية أن كل المواد القابلة للاحتراق والمعادن (الفلزات) القابلة للتأكسد تتكون من أصول زئبقية وكبريتية وملحية وهي نظرية الفلوجستون ولم يعرف العالم هذه النظرية إلا بعد جابر بألف عام ، ونظرية الإتحاد الكيميائي التي تقول بأن الاتحاد الكيميائي يحدث باتصال ذرات العناصر المتفاعلة بعضها مع بعض، وهي النظرية التي قال بها (دالتون) بعد جابر بألف عام.

كان كثير القرب منهارون الرشيد والبرامكة وبسبب هذا القرب زعم البعض في زمن جابر وبعد زمانهأن أسراره في الكيمياء من أسباب ثرائهم الفاحش ، وقد ابتكر المواد التيتكفل التغلب على مشاكل الجنود وعبورهم لمياه البحار وقراءة الرسائل فياللياليالمظلمة مما ساعد في انتصارات جنود الرشيد والبرامكة في الفتوحات.

هوالذي حضر حجر الكي أو حجر جهنم (نترات الفضة) لكي الجروح والعضلات الفاسدة ومازال هذا الأمر معروفاً حتى اليوم ، وحضر مداداً مضيئاً من صدأ (بيريت) الحديد ينفع في كتابة المخطوطات الثمينة ورسائل الجيش لتقرأ في الليالي المظلمة ، وحضر طلاء يقي الثياب من البلل، وآخر يقي الحديد من الصدأوثالثاً يقي الخشب من الاحتراق وكانت هذه الطلاءات هي البداية لعلم البلمرات الآن.

اكتشف جابر الورق غير القابل للاحتراق لتكتب عليه الوثائق النفيسة والرسائل المهمة، واكتشف بعد الماء الملكي وماء الذهب وماء الفضة وعنصر البوتاس وملحالنشادر وكبريتيد الزئبق وحمض الكبريتيك وسلفيد الزئبق وأكسيد الزرنيخوكربونات الرصاص وعنصر الانتيمون وعنصر الصوديوم ويوديد الزئبق وزيت الزاجالنقي ،وكان قد اكتشف من قبل حمض النيتريكوحمض الهيدروكلوريك وتمكن بهما معاً من اكتشاف ماء الذهب.

أوجد جابر طرائق لتقطير الخل المركز (الأستيك أسيد) المعروف الآن باسم الخليك الثلجي وطرائق لصبغ القماش (علم الصباغة) ودباغة الجلود علم الدباغة وفصلالفضة عن الذهب بحمض النيتريك (علم تركيز الخامات) واستعمل أكسيد المغنسيومفي صناعة الزجاج ، ووصف العمليات الطبيعية الكيميائية وصفاً دقيقاً (تبخير وترشيح وتكثيف وتبلور وإذابة وتصعيد) وسبق العالم كله بأبحاثه في التكليسوإرجاع المعدن إلى أصله بواسطة الأكسجين. وابتكر آله لاستخراج الوزن النوعي للمعادن وللأحجار والسوائل والأجسام التي تذوب في الماء ، وتحدث عن السمومورفع مضارها فوضع بذلك أساس علم السموم.

عاد إلى قريته طوس مع بدء نذرنكبة البرامكة وكان عمره تسعاً وثمانين سنة ، وهناك عكف على العمل والتجربة وتدوين الكتب الكبيرة والصغيرة وبلغ عدد أهمها 45 كتاباً من بينها كتب عن الأحجار والذهب والزئبق والحيوان والأرض ، وكتب في أصول صناعة الكيمياء ما يحمل عناوين : التدابير ، البحث ، التركيب ، الأسرار ، التصريف ،الأصول ، التجميع ، وكتب 112 مقالاً في صناعة الكيمياء منها سبعون مقالاًشرح بها مذهبه في الكيمياء وهي خير ماكتب، ومائة وأربعين مقالاً في علم الموازين.

بعد خمسة قرون من وفاة جابر عن ثلاث وتسعين سنة (في قريته طوس) بدأ الأوروبيون يترجمون مجموعات من كتبه إلى اللاتينية عن اللغة العربية ومن أشهر هذه الكتب : الخالص ، الاستتمام ، الاستيفاء ، التكليس.

ويذكرهو لميارد في كتابه (الكيمياء إلى عصر دالتون) أن ترجمة مؤلفات جابر إلى اللاتينية كانت عاملاً قوياً في إحياء الكيمياء في أوروبا ، ولم يحدث أنحظيت كتب بالشهرة والذيوع في العصور الوسطى مثلما حظيت به كتب جابر بن حيان، فقد أصبحت كتبه أساساً لعلم الكيمياء في أوروبا إلى نهاية القرن الثامن عشر وبسبب أبحاثه الدقيقة الشامله استحق جابر لقب المؤسس الأول للكيمياءعلى قواعد علمية سليمة وأسس راسخة.

.الطاقه النووية:

الطاقه النوويه او الطاقه الذريه هي الطاقه التي تتحرر عندما تتحول ذرات عنصر كيمائي الى ذرات عنصر اخر، الذرات هي اصغر الجسيمات التي يمكن ان يتفتت اليها أي شيء كان. وعندما تنفلق ذرات عنصر ثقيل الى ذرات عنصرين اخف ، فان التحول يسمى "انشطارا نوويا " ويمكن ان يكون التحول " اندماجا نوويا " عندما تتحدد اجزاء ذرتين.

يعول على الطاقه النوويه ان تصبح اعظم مصادر الطاقه في العالم بالنسبه للاضاءه والتسخين وتشغيل المصانع وتسيير السفن وغير ذلك من الاستخدمات التي لا حصر لها. من ناحية اخرى ، يخاف بعض الناس الطاقه النوويه لانها تستخدم ايضاً في صنع اعظم القنابل والاسلحه فظاعة وتدميرا في تاريخ العالم . كما ان بعض نواتج عمليه الانشطار تكون سامه للغايه.

انتاج الطاقه النووية:

اليورانيوم والبلوتونيوم هما العنصران المستخدمان في انتاج الطاقه بواسطة الانشطار النووي. كل ذرة من ذرات اليورانيوم او البوتونيوم(او أي عنصر اخر) لها " نواة " عند مركزها تتكون من " بروتونات " و "نيوترونات ".

الانشطارالنووي:

عندما يتصادم نيوترون سائب مع ذرة يورانيوم او بلوتونيوم فان نواة الذرة " تأسر " النيوترون.

عندئذ تنفلق النواه الى جزئين ، مطلقه كميه هائله من الطاقه كما انها تحررنيوترونين او ثلاثه تتصادم هذه النيوترونات مع ذرات اخرى ويحدث نفس الانشطار في كل مره، وهو ما يسمى بالتفاعل المتسلسل.

ملايين الملايين من الانشطارات يمكن ان تحدث في جزء من المليون من الثانيه . وهذا هو ما يحدث عندما تنفجر قنبله ذريه وعندما تنتج الطاقه النوويه للاغراض السلميه العاديه فانه يلزم ابطاء التفاعل المتسلسل .

ولانتاج الطاقه للاغراض العاديه تحدث الانشطارات في اله تسمى المفاعل النووي او الفرن الذري . يتم التحكم في سرعة الانشطارات بطرق مختلفه في احدى الطرق تستخدم قضبان التحكم التي تقصى بعض النيوترونات بعيدا عن التفاعل.

كيف نعيش الاندماج النووي:

هذا ايضاً يسمى التفاعل النووي الحراري لانه يحدث فقط عند درجات حرارة عاليه جداً . وهو عكس الانشطار النووي . حيث تنصهر (تتحد) معا نواتان خفيفتان لتكونا نواة اثقل.

تأتي الطاقه الشمسيه الهائله من الاندماج النووي ، اذا تنصهر انوية ذرات الهيدروجين الخفيفه لتكون ذرات الهيليوم الاثقل. تنطلق اثناء ذلك كميات هائله من الطاقه في صوره حراره.

الاندماج النوويه والذي ينتج الطاقه المدمره للقنبله الهيدروجنيه . ومع ذلك ، يمكن للاندماج النووي في المستقبل ان يكون احد اعظم المصادر الثمينه للطاقه السليمه لانه يمكنه استخدام مياه البحار البحيرات والنهار في انتاج القوى النوويه.

استخدام الطاقه النووية:

تستخدم الطاقه النوويه الان في اغراض كثيره ، فهي تولد الكهرباء وتسير السفن وتستخدم في المصانع والمستشفيات.

الكهرباء: تنتج محطات توليد القوى النوويه بعض الكهرباء التي يستخدمها الناس كليوم . يوجد في كل محطه مفاعل نووي يتم فيه الانشطار النووي الذي يحررالطاقه في صورة حراره . تمرر هذه الحراره الى غاز او سائل يسمى المبرد .

وينتقل المبرد الى مبادل حراري حيث يسخن الماءويحوله الى بخار . عندئذيستخدم البخار في تشغيل توربين ويسير التوربين مولد للكهرباء.

استخدامات اخرى : تستخدم التوربينات التي تعمل بالانشطار النووي كذلك في تسيير السفنوالغواصات . ونظرا لان المفاعلات النوويه لا تحتاج الى اكسجين ، فانالغواصات النوويه يمكنها البقاء تحت الماء لفترات زمنيه طويله.

هناك انواع معينه من الذرات الناتجه اثناء الانشطار النووي تساعد الاطباء فيتشخيص (التعرف على) الامراض ومكافحتها . تسمى هذه الذرات النظائر المشعه، وهي ذات استخدامات اخرى كثيره في الصناعه والزراعه.

أنواع التفاعلات النووية:

يمكن تقسيم التفاعلات النووية الى أربعة أقسام وهي:

التحلل النووي التلقائي.

التفاعل النووي غير التلقائي.

لانشطار النووي.

الاندماج النووي.

التحلل النووي التلقائي:

تتحلل أنوية العناصر الثقيلة غير المستقرة تلقائياً وتصدر عنها اشعاعات تعرف بالاشعاعات النووية.

ومن العناصر التي تجري هذا النوع من التفاعلات عنصر اليورانيوم (يورانيوم) – i238i، فقد تبين أنه يشع جسيمات الفا ، ونتيجة لذلك يتحول الى عنصر آخر مشع هو عنصر الثوريوم (ثوريوم) i234i – ، الذي بدوره يطلق جسيمات بيتا مع اشعاع غاما ويتحول الى عنصر البروتاكتينيوم

(بروتاكتينيوم) i234i – ، وتستمر التحولات الى أن ينتج عنصر الرصاص غير المشع ، فأنوية ذراته مستقرة.

التفاعل النووي غير التلقائي:

في هذا النوع من التفاعلات تستخدم الجسيمات النووية كقذائف تسلط على أنوية ذرات مستقرة فتحولها الى أنوية غير مستقرة ، وتتكون بفعل ذلك ذرات جديدة.

ومن أمثلة هذا النوع من التفاعلات قذف ذرات البريليوم بجسيمات الفا وينتج بفعل ذلك عنصر الكربون.

وقد تمكن العلماء من استخدام هذا النوع من التفاعلات النووية لتحضير عناصر ثقيلة من عناصر أخف منها.

ومن الأمثلة على ذلك تحويل الألومنيوم الى نظير الفسفور.

الانشطار النووي:

نظراً لقدرة النيوترونات على الاختراق ، فهي أجسام غير مشحونة فقد استخدمتك قذائف يمكن أن تصل الى النواة بسهولة فتندمج معهاأو تشطرها وقد قام العلماء بتسليط النيوترونات على ذرات عنصر اليورانيوم (يورانيوم) i235i – واكتشفوا أن ذرة اليورانيوم تنشطر الى جزأين ، وينتج عن ذلك ايضاً ثلاثة نيوترونات وكمية هائلة من الطاقة.

وكل نيوترون له القدرة على أن يكررالتفاعل السابق مع ذرة يورانيوم أخرى ، وهذا ما يعرف بالتفاعل النووي المتسلسل الذي يؤدي الى أعداد هائلة من الانشطارات ، وينتج عن ذلك كميات هائلة من الطاقة.

استرعى هذا التفاعل اهتمام العسكريين وتمكنوا من خلاله من صنع القنبلة النووية ، كما أن هذا التفاعل يستخدم للحصول على الطاقة الكهربائية في المحطات الكهرنووية

.الاندماج النووي:

يشتمل هذا التفاعل على اندماج نواتين خفيفتين لانتاج نواة أكبر.

ومثال ذلك اندماج ذرات نظائر الهيدروجين لاعطاء ذرات هيليوم وكمية هائلة من الطاقة.

ورغم اعطاء هذا التفاعل كمية هائلة من الطاقة ، الا أنه لا يبدأ الا اذا زود بطاقة عالية للتغلب على التنافر الشديد بين أنوية الذرات التي ستندمج ، ومثل هذه الطاقة لا يتم توفيرها الا من خلال تفاعل انشطار نووي.

ويعتقد أن هذا التفاعل هو المسؤول عن الطاقة المنبعثه من الشمس. الانشطار النووي/ الاندماج النووي:

الانشطار Fission القنبلة الذرية (A-Bomb) والاندماج Fusion القنبلة الهيدروجينية (H-Bomb) هناك نوعين من الانجارات الذرية يمكن أن إنجازها بواسطةاليورانيوم 235 "U-235" وهي الانشطار والاندماجالانشطار ببساطة هو التفاعل النووي الذي فيه تنقسم نواة الذرة إلى شظايا، وعادةتكون إثنتين ذات كتل متساوية، مع نشوء حوالي 100 مليون إلى عدة مئات منملايين فولتات الطاقة. هذه الطاقة تنقذف متفجرة وبعنف شديد في القنبلة الذرية. الإندماج هو تفاعل يبدأ بثبات بتفاعل إنشطاري، ولكن بخلاف الإنشطار الذري فإن الإندماج (القنبلة الهيدروجينية) تستمد قوتها من اندماج أنوية النظائر المختلفة للهيدروجين لتكوين نواة هيليوم. وكون القنبلة فيهذا القسم هي بالتحديد ذرية، فإن المكونات الأخرى من القنبلة الهيدروجينية ستكون موضوعة جانبا في هذا الوقت.

إن القوة الهائلة خلف التفاعل في القنبلة الذرية ينتج من القوى التي تجعل الذرة متماسكة مع بعضها. هذه القوى مماثلة ولكن ليست تماما للمغناطيسية.

الذرات تتألف من ثلاث أجزاء أقل .البروتونات وكلستر النيوترونات معا تكونان النواة (الكتلة المركزية) الخاصة بالذرة، بينما الإلكترونات تدور حول النواة، وهي تشبة في ذلك الكواكب حولالشمس. إن هذه المكونات هي التي تحدد الثبات في الذرة.

إن معظم عناصرالطبيعة لها ذرات ذات ثبات كبير، وبالتالي فإنه من المستحيل أن تنقسم إلابواسطة قصفها بواسطة الجزيئات الحافزة. ولجميع الأغراض العملية، فإن العنصرالحقيقي الذي يمكن لذرته أن تنشطر بتساو وسهولة هو معدن اليورانيوم.

ذرات اليورانيوم على غير العادة كبيرة الحجم، ولهذا السبب فإن من الصعب عليها أن تبقى معا بثبات. وها يجعل اليورانيوم 235 هو الشئء المناسب تمام اللإنشطار النووي.

اليورانيوم معدن ثقيل وهو أثقل من الذهب، وليس فقط له أكبر الذرات حجما منأي معدن طبيعي آخر، فأيضا الذرات التي يتكون منها اليورانيوم بها نيوترونات أكثر بكثير من البروتونات. وهذا لا يحفز قدرته اللإنشطار ولكن يعطيها احتمالا أكثر أهمية في قدرتها لتسهيل الإنفجار.

هناك نظيرين لليورانيوم. إن اليورانيوم الطبيعي يتكون غالبا من النظير 238، والذي به 92 بروتون و146 نيوترون "92+146=238". وتجد ممزوجا مع هذا النظير نسبة 0،6% من اليورانيوم نوع نظير 235، والمحتوي فقط على 143 نيوترونا. هذا النظير، بخلاف اليورانيوم 238 له ذرات يمكن أن تنشطر، ولهذا يطلق عليه مصطلح قابل للإنشطار، ومفيد في صنع القنابل الذرية. وحيث أن اليورانيوم U-238 هو ذو النيوتروناالثقيل، فإن ذلك يعكس النيوترونات بدلا أن يمتصها مثل ما يفعل أخيه النظير U-235. اليورانيوم من نوعU-238 لا يخدم أي عمل فيمهمات التفاعل الذري، ولكن خصائصه تجعله يزودنا بغلاف واقي ممتازلليورانيومU-235وذلك عند إنشاء القنبلة كعاكس للنيوترونات. وهذا يساعد فيالوقاية من تصادف حدوث سلسلة تفاعل بين اليورانيوم 235 ذو الكتلة الأكبر ورصاصتها المتممة لها داخل القنبلة.

لاحظ أيضا أنه بينما اليورانيوم 238 لا يخدم التفاعل المتسلسل، فإنه يمكن أن يكون المادة المشبعة بالنيوترونات لإنتاج البلوتونيوم .(Pu-239) والبلوتونيوم مادة قابلة للإنشطار ويمكن أن تستعمل في مكان اليورانيوم 235 (وإن يكن مع نوعآخر من المفجرات) في القنبلة الذرية.

إن كل من نوعي اليورانيوم مشعبطبيعته. وذراتهما الثقيلة تتحلل على مدى فترة زمنية. وإذا ما أعطيا فترة كافية من الزمن . (أكثر بكثير جدا من مئات الألوف من السنين) فإن اليورانيوم في الواقع يفقد أجزاء كثيرة منه للدرجة أنه سيتحول إلى معدن آخرهو الرصاص. ومع ذلك فإن عملية الإنحلال يمكن تسريعها بالعملية المعروفة بإسم التفاعل التسلسلي .chain reaction الذرات تجبر على الإنشطار بواسطةالنيوترونات التي تأخذ طريقها بقوة إلى النواة. إن ذرة اليورانيوم 235 تكون غير مستقرة لدرجة أن صدمة من نيوترون واحد كاف لأن يقسمها وبالتالي يتسببفي حدوث التفاعل المتسلسل (بسبب تحرر نيوترونات أكثر)

وهذا يمكن أن يحدث حتى عندما (نسبيا أقل) تتواجد كتل حرجة.

عندما يحدث هذا التفاعل المتسلسل، فإن ذرة اليورانيوم تنشطر إلى ذرتين أصغر من عناصر مختلفة مثل الباريوم والكريبتون.

عندما تنقسم ذرة اليورانيوم 235، فإنه ينتج عنها طاقة بشكل حرارة وإشعاع من نوع جاما، والذي يعتبر هو أقوى شكل من أشكال الإشعاع وأكثرها إماتة. وعندما يحدث هذا التفاعل، فإن الذرة المنقسمة ستعطي أيضا أثنين أو ثلاثة مننيوتروناتها "الزائدة"، والتي لا يحتاج إليها لعمل الباريوم أو الكريبتون .

هذه النيوترونات الزائدة تطير خارجا بقوة كافية كي تشطر ذرات أخرى تصادفهافي طريقها. ونظريا فإنه من الضروري القيام بشطر ذرة يورانيوم واحدة كي تقوم النيوترونات المنفصلة منها بشطر الذرات الأخرى، والتي هي بالتالي تخرج منها نيوترونات لشطر ذرات أخرى وهكذا. إنهذه المتوالية لا تتم في الواقع حسابيا ولكن بتوال هندسي.

إن كل هذا سيحدث خلال جزء من مليون من الثانية.

إن أقل كمية كي تبدا التفاعل المتسلسل كما تم وصفه يعرف بالكتلة الحرجة العظمى Supercritical Mass. والكتلة الفعلية التي يحتاج إليها لتسهيل هذا التفاعل المتسلسل تعتمد على نقاوة المادة، ولكن بالنسبة لليورانيوم 235 النقي فإن هناك حاجة لخمسون كيلوجراما، ولكن لأنه لا يوجد يورانيوم نقي للغاية ولهذا ففي الواقع هناك حاجة لكمية أكبر.

الأحمــاض النووية Nucleic Acid :

أحماض النيوكليك أو الأحماض النووية هي عبارة عن جزيئات جسيمة توجد في جميع الخلايا الحية في صورة طليقة أو متحدة مع البروتين، وبدأ علماء (الكيمياء الحيوية) أبحاثهم على الأحماض النووية منذ حوالي مائة عام مضت حين إستطاعوا فصلها من أنوية الخلايا فالأحماض النووية توجد في كل الخلايا الحية حيث أنها ليست فقط مسؤولة عن حمل وانتقال التعليمات الجينية (الصفات الوراثية)

ولكنها تتحكم أيضاً في ترجمة هذه التعليمات عند تكوين البروتينات المختلفة بالخلايا وذلك بتحكمها في ترتيب وتتابع الأحماض الأمينية لكل بروتين يتكون بكل خلية والأحماض النووية لها وزن جزيئي مرتفع وهي عبارة عن نيوكلتيدات (بولي نيوكلتيدات) وحداتها البنائية هي النيوكلتيدات.

وكانت الدراسات الكيميائية في بادئ الأمر تجري على أحماض النيوكليك من مصدرين: أحدهما الخميرة،ووجد أنها تحتوي على سكر ريبوز ولذلك سميت بأحماض الريبو نيوكليك (RNA) والثاني من الغدة التيموسية بالعجول ووجد أنها تحتوي على سكر دي – أوكسي – ريبوز ، ولذلك سميت بأحماض الدي – أوكسي – ريبونيوكليك (DNA) مما أدى إلى الإعتقاد لبعض الوقت بأن الحمض الأول خاص بالنباتات والثاني خاص بالحيوانات ، ثم اتضح أن (DNA) موجود بالنواة وأن (RNA) موجود في السيتوبلازم. ونتيجة للدراسات الحديثة بطرق التحليل المحسنة أمكن العثورعلى كميات صغيرة من (DNA)في السبحيات والبلاستيدات الخضراء كما أمكن التعرف على (RNA) في النواة متصلاً بالنوية.

وعند معاملة حمض النيوكليك المستخلص من الخميرة بمحلول عياري من الصودا الكاوية يتحلل مائياً إلى مركبات يطلق عليها (نيوكلتيدات) وبمعاملة هذه الأخيرة بحمض هيدروكلوريك تتحلل مائياً إلى مكوناتها الثلاث الرئيسية وهي : قاعدة نيتروجينية – وسكرخماسي – وحمض فسفوريك.

أنواع الأحمـاض النوويةKinds of Nucleic Acid :

يوجد نوعين من الأحماض النووية كما تقدم..هما:

أ/ الحمض الرايبونيوكلتيدي (Ribonucleic Acid (RNA

ب/ الحمض الديؤكسي رايبونيوكلتيدي(Deoxyribonucleic Acid (DNA

ويتكون البناء الأساسي لهده الأحماض من سلاسل بها جزيئات حمض فسفوريك وسكر بالتبادل ويتصل بكل جزيء من جزيئات السكر قاعدة آزوتية إما من نوع البيورين أو البيرميدين ، والسكر الموجود بجزيء الحمض الرايبونيوكلتيدي (RNA) هو سكر الرايبوز بينما في جزيء الحمض الديؤكسي رايبونيوكلتيدي (DNA) فهو سكرالديؤكسي رايبوز.

مكونات أحماض النيوكليك:

يتكون حمض نيوكليك من ثلاثة أنوع من المركبات كما ذكرنا:

- حمض الفسفوريك.
- سكر خماسي الكربون وهو سكر الرايبوز أو دي – أوكسي – رايبوز.

• وقواعد نيتروجينية تتبع البيورينات أو البيرميدينات

يوجد بأحماض النيوكليك نوعان من السكر الخماسي ، أحدهما هو D – رايبوز ويوجد فيحمض (RNA) ، والثاني ديؤكسي رايبوز ويوجد في حمض (DNA) ، وأعطيت ذراتكربون السكر الخماسي الأرقام التالية َ1، َ2، َ3، َ4 ،َ5 لتمييزها عن الأرقام المعطاة لذرات الكربون والنيتروجين الموجودة في البيرميدين والبيورين. ومن الخصائص الهامة للسكر الخماسي هو قدرة المجاميع الهيدروكسيلية على تكوين إسترات مع حمض الفسفوريك وخاصة تلك المجاميع الموجودة على الكربون الثالث والكربون الخامس.

البيورينات والبيرميديناتPruines & Pyrimidine

1/ قواعد بيورينية : وتنتج من التحام حلقة إيميدازول الخماسية مع حلقة البيرميدين وأهم هذه القواعد.

• أدينين Adenine .

• جوانين Guanine .

2/ قواعد بيرميدينية : وهذه القواعد مشتقة من البيرميدين بإستبدال ذرات الهيدروجين الموجودة على كربون رقم 2،4،5 بمجاميع أمينو أوهيدروكسيل أوميثايل وأهم هذه القواعد:

- سيتوزينCytosine .
- يوراسيلUracil .
- ثايمين Thymine .

ويحتوي كلاً من الحمضيين النوويين DNA و RNA على القاعدتين الآزوتيتين من البيورين وهما الأدينين Adenine والجوانين Guanine ونجد أيضاً أن كلاً من الحمضيين النوويين DNA و RNA يحتوي على قاعدة آزوتية من نوع البيرميدين وهيسايتوزين Cytosine ولكنهما يختلفان في القاعدة الآزوتية الثانية من نوع البيرميدين فبينما يحتوي الحمض النووي RNA على القاعدة الآزوتية يوراسيل Uracil يحتوي الحمض النووي DNA على القاعدة الآزوتية ثايمينThymine .

مجموعة الفوسفاتPhosphate Group

تربط مجموعة الفوسفات بين مجموعات السكر الخماسية في سلاسل كل من الحمضين (DNA)و(RNA).

النيوكليوزيداتNucleosides

النيوكليوزيدات هي مركبات ناتجة من اتحاد أحد جزيئات القواعد الآزوتية من نوع البيورين أو البيرميدين مع جزيء السكر بيتا- رايبوز أو بيتا- ديؤكسي رايبوز برابطة جليوكسيدية (بيتا) ، وفيها تتصل القاعدة الآزوتية مع مجموعة هيدروكسيل هيميأسيتال على ذرة الكربون الأولى للسكر. ومكان اتصال القاعدة الآزوتية بالسكر.

النيوكليتيداتNucleotides

النيوكليتيدات هي إسترات حمض الفوسفوريك للنيوكلوزيدات وهناك واحد من أهم النيوكليتيدات الموجودة طبيعياً وهو الأدوينوسين أحادي الفوسفات وهذا المركب (AMP) مع إثنين من مشتقاته وهما أدينوسين ثنائي الفوسفات(ADP) وأدينوسين ثلاثي الفوسفات(ATP) يلعب دوراً هاماً في حفظ الطاقة وفي الإستفادة من الطاقة المنطلقة خلال عمليات التمثيل الغذائي بالخلايا والأهمية الفسيولوجية لهذه المركبات تكمن في قدرتها على إعطاء وإكتساب مجموعات فوسفاتية في التفاعلات البيوكيميائية . وتسمى النيوكليوز يدات والنيوكليتيدات تبعاً للقاعدة النيتروجينية الموجوده بها.

فصل الأحماض النوويةIsolation Of Nucleic Acid

تطحن الأنسجة المراد إستخلاص الأحماض النووية منها على درجة حرارة منخفضة (أقل من40 درجة م) وذلك بعد إضافة محلول مائي للفينول المركز وصوديوم لورايلسلفات (أو أي مادة اخرى مناسبة لتقليل الجذب السطحي) إليها . بعد هذه المعاملة يتغير التركيب الطبيعي للبروتينات الموجودة بالأنسجة وتصبح غيرذائبة في المحلول المائي وترسب بينما نجد أن الأحماض النووية تظل ذائبة في المحلول المائي. وبترك المطحون المتجانس الناتج ينفصل إلى طبقتين سائلتين ويمكن الإسراع بفصل الطبقتين بإجراء عملية طرد مركزي على درجة حرارة منخفضة.

حيث يتم بعدها فصل الطبقة العليا المائية (والمحتوية على الأحماض النووية جميعها) عن الطبقة السفلى الأخرى الغنية بالفينول والتي يستغنى عنها.

ترسب الأحماض النووية من الطبقة المائية المفصولة وذلك بإضافة كحول الإيثايل اليها بعد ذلك يفصل الراسب المتكون بواسطة الطرد المركزي . وتنقى الأحماض النووية به بإذابته في الماء ثم إعادة ترسيبه بالكحول كما سبق وفصله بالطرد المركزي على صورة نقية.

ويمكن فصل كل من الحمضينالنووين DNA و RNA كل على حدة بعد ذلك إما بمعاملته بإنزيم ريبونيوكليز(Ribonucleasa) وذلك لتكسير الحمض النووي RNA وتحويله إلى جزيئات صغيرهذائبة مع ترك الحمض النووي DNA كما هو بدون التأثير عليه .

أو بمعاملة الخليط بإنزيم ديؤكسي ريبونيوكليز(Deoxyribonuclease) حيث تتكسر جزيئات الحمض النووي DNA تاركاً الحمض النووي RNA بدون تأثر . وبعد التخلص من أحد الحمضين النوويين يضاف محلول مائي للفينول وذلك لترسيب وإزالة ما تبقى منبروتين ثم تفصل الطبقة المائية المحتوية على الحمض النووي المراد الحصول عليه بالطرد المركزي حيث بضاف لها بعد ذلك كحول الإيثايل لترسيب الحمض النووي.

وحيث أن الحمض النووي DNA على صورته الطبيعية عبارة عن لولب حلزوني طويل فإن إضافة كحول الإيثايل إليه ينتج عنه ترسيب DNA على هيئة راسب طويل ليفي حيث يمكن الحصول عليه من المحلول بلفه حول محرك زجاجي حيث يوضع بعد ذلك في مذيب مناسب مثل الأسيتون لتجفيفه حيث يسهل إزالته جافاً عن المحرك الزجاجي ويحفظ جافاً في زجاجات على درجة حرارة – 20 درجة م.

وعند استخدام الطريقة السابقه للحصول على الحمض النووي RNA فإننا نحصل على خليط غير متجانس من الأنواع المختلفة للحمض النووي الرايبونيوكلتيدي. RNA وهوالحمض النووي الناقل tRNA والحمض النووي الرسول mRNA والحمض النوويا لرايبوسومي . rRNA ولإجراء فصل لكل نوع في هذا الخليط عن الآخر يستخدملذلك الفصل الكروماتوجرافي على أعمدة من الكيز لجهر المغطى بطبقة من ميثايل الألبومين (MAK)أو بالطرد المركزي على محلول سكروز متدرج التركيز (Sucrose Gradient) وبإستعمال هذه الطرق يفصل الخليط الى مكونات تبعاً لنوع النسيج الذي استخلصت منه.

فإذا كان من البكتيريا E.coli مثلاً فإن الخليط سيفصل الى ثلاث مكونات ، المكون الأول هو 4S (tRNA) والثاني 16 S والثالث (*)23S وذلك من الحمض النووي RNA والذي نتج من الرايبوزومات 70 Sبالبكتيريا بعد أن انقسمت وحداتها الريبوزومية 30 Sو 50 . S

بينما في حالة فصل الحمض النوويRNA المفصول من أنسجة الثدييات نحصل على نوعين أحدهما 18 – 22 S والآخر 28 – 34 S وهذه نتجت من أنواع الرايبوزومات 80 S بعد أن انقسمت وحداتها الرايبوزومية 40 S و60. S

خواص الأحماض النوويةProperties Of Nucleic Acid :

تمتص القواعد الآزوتية من نوع البيورين والبيرميدين الموجودة في الأحماض النووية الأشعة الفوق بنفسجية بدرجة كبيرة عند موجة ذات طول 260 نانوميتر (260 nm) .وتستخدم هذه الخاصية لتقدير هذه القواعد الآزوتية كمياً لتقديرنيوكليتيداتها وأيضاً الأحماض النووية الداخلة بتركيبها.

وعلى كل حالفان الحمض النووي DNA له معامل امتصاص نوعي عند طول الموجة 260 نانومتيريقل بمقدار حوالي 35 – 40 % عن معامل الامتصاص النوعي المتوقع من حاصل جمعالامتصاص لك قاعدة (على حدة) من القواعد الداخلة بتركيب الحمض النووي . DNA وهذه النظرية تمسى بنظرية التاثير الهيبوكرومي Hypochromic) . (وهاالانخفاض في درجة الامتصاص النوعي للاشعة فوق البنفسجية بالنسبة للقواعد الازوتية المتحدة بجزيئات الحمض النووي DNA عن نظيراتها القواعد الحرة نتيجة لتكون روابط هيدروجينية بين القواعد الازوتية المتراكبة الواحد فوق الأخرى في كل من السلسلتين الحلزونيتين للحمض النوويDNA. وهذه الخاصية مفيدة في تقرير درجة الحلزونية (Helicity) للحمض النووي. DNA

وعند تسخين الحمض النووي DNA المبلمر بدرجة كبيرة ببطء فان السلسلتين حلزونيتي الشكل به تبتعدان عن بعضهما وتسمى عملية الابتعاد هذه بعملية انفصال اوتشتيت السلسلتين .(Melting) وهذا التحول من الشكل الحلزوني ذو السلسلتينالى أي شكل عشوائي يحدث خلال رفع درجة الحرارة عدداً قليلاً من الدرجات ونتيجة لهذا التحول تزداد درجة الامتصاص النوعي.

وتسمى درجة الحرارة التي يحدث عندها الزيادة المفاجئة في الامتصـاص لـلأشعة فوق البنفسجية بدرجة حرارة الانفصال (Melting temperature Tm) للحمض النووي .

ولكل نوع من انواع الحمض النووي DNA درجة Tm خاصة به . اما عند اعادة تبريد المحلول ببطء فانه يحدث اعادة لتكوين الشكل الحلزوني ذو السلستين معا مكانية حدوث تبادل بين السلاسل وتسمى ههذه العملية Annealing .

ويلاحظ أن السلسلتين المكونتين للشكل الحلزوني في الحمض النووي DNA متوازيتان ولكنهما معكوستان (Ant parallel) والقواعد الازوتية بهما مزدوجة (Paired) بنظام A مع T و G مع c وهذا التخصص في الازدواج يعتمد على الروابطالهيدروجينية بين القواعد الازوتية فنجد ثلاثة روابط هيدروجينية لكل زوج G - C ورابطتين هيدروجينيتين لكل زوج. A – T

ويمكن تشتيت سلسلتي الحمض النووي DNA عن بعضهما إذا انخفض رقم pH المحلول عن 4 او اذا ارتفع عن 11 . حيث أن الأحماض النووية عبارة عن الكتروليتات عديدة (Polyelectrolyte's) مع وجود شحنة سالبة واحدة لكل وحدة نيوكليوتيدية (هذه الشحنة ناتجة عنتاين الفوسفات ثنائي الاستر) في نطاق pH من 4 الى 11 . بينما عند pH اقل من 4 نجد ان المجموعات الامينية لقواعد الادنين والجوانين والسيتوزين تكتسب بروتوناً مع تحطم نظم الروابط الهيدروجينية . اما عند pH اعلى من 11 فانبروتونات مجموعات الهيدروكسيل على الجوانين والسيتوزين والثايمين (الناتجة من التغيرات الكيتونية الاينولية) Keto – enol tautomers تنفصل مع تحطم الروابط الهيدروجينية.

أما بالنسبة لتأثير الحرارة على الحمض النووي RNA نجد أن الوضع يختلف لان الحمض النووي RNA المستخلص من معظم المصادر يكون ذو سلسلة مفردة Single) (Stranded – مع وجود أماكن قصيرة بهاطيات على نفس السلسلة مكونة أماكن بها ازدواجيات بالسلسلة(Double – Stranded regions) لذا فان شكل المنحنى الخاص بتأثير الحرارة على درجة امتصاصه للضوء فوق البنفسجي (Melting profile) يتميز بزيادة قليلة في الامتصاص عند زيادة الحرارة وهذه الزيادة تكون غير حادة . ويجدر بالذكر أن الصفات الجينية في عدد قليل من أنواع الفيروسات تحمل على الحمض النووي RNA ذو السلسلتين مزدوجتين وان نظام ازدواج القواعد الازوتية به G – C و A – U .

الفصل التاسع عشر

الكيمياء النووية ودورها في الكيمياء الأساسية

ماهية الكيمياء الأساسية:

الكيمياء فرع من فروع العلم يختص بدراسة تركيب المواد والتفاعلات التى تحدث بينها وهذا العلم قد تفرع بدوره الى أفرع عديدة منها من أختص بالمواد غير العضوية كالفلزات وغيرها ومنها من أختصب المواد العضوية مثل السكريات وغيرها ومع تطور علوم التشريح ووظائف الاعضاء فتح ذلك مجالاً واسعاً لدراسة العمليات الحيوية التى تجرى داخل الجسم فيما يسمى (بالكيمياء الحيوية) التي تختص بدراسة كيمياء الكائنات الحية ، حيث تبحث في تركيب مادتها ، وفي معرفة النظم الحيوية التي يتكون منها جسم الكائن الحي والتغيرات التي تحدث لهده النظم الدقيقة مادام الكائن على قيد الحياة فتنير الطريق للتقدم في الميادين النختلفة سواء من ناحية التغذية أو النواحي الصحية أو الإستفادة من الموارد الطبيعية سواء نباتية أو حيوانية ، والأهم من ذلك التدبر في خلق الكائن الحي وما وضعه فيه الخالق جل شأنه من نظام دقيق يبين عظمة الخالق وإعجازه في خلقه.

الأحماض النووية Nucleic Acid:

أحماض النيو كليك أو الأحماض النووية هي عبارة عن جزيئات جسيمة توجد في جميع الخلايا الحية في صورة طليقة أو متحدة مع البروتين، وبدأ علماء (الكيمياء الحيوية) أبحاثهم على الأحماض النووية منذ حوالي مائة عام مضت حين إستطاعوا فصلها من أنوية الخلايا فالأحماض النووية توجد في كل الخلايا الحية حيث أنها ليست فقط مسؤولة عن حمل وانتقال التعليمات الجينية (الصفات الوراثية) ولكنها تتحكم أيضاً في ترجمة هذه التعليمات عند تكوين البروتينات المختلفة بالخلايا وذلك بتحكمها في ترتيب وتتابع الأحماض الأمينية لكل بروتين يتكون بكل خلية والأحماض النووية لها وزن جزيئي مرتفع وهي عبارة عن نيوكلتيدات (بولي نيوكلتيدات) وحداتها البنائية هي النيوكلتيدات.

وكانت الدراسات الكيميائية في بادئ الأمر تجري على أحماض النيوكليك من مصدرين : أحدهما الخميرة، ووجد أنها تحتوي على سكر ريبوز ولذلك سميت بأحماض الريبو نيوكليك (RNA) والثاني من الغدة التيموسية بالعجول ووجد أنها تحتوي على سكر دي – أوكسي – ريبوز ، ولذلك سميت بأحماض الدي – أوكسي – ريبونيوكليك (DNA) مما أدى إلى الإعتقاد لبعض الوقت بأن الحمض الأول خاص بالنباتات والثاني خاص بالحيوانات ، ثم اتضح أن (DNA) موجود بالنواة وأن(RNA) موجود في السيتوبلازم.

ونتيجة للدراسات الحديثة بطرق التحليل المحسنة أمكن العثور على كميات صغيرة من (DNA) في السبحيات والبلاستيدات الخضراء كما أمكن التعرف على (RNA) في النواة متصلاً بالنوية.

وعند معاملة حمض النيوكليك المستخلص من الخميرة بمحلول عياري من الصودا الكاوية يتحلل مائياً إلى مركبات يطلق عليها (نيوكلتيدات) وبمعاملة هذه الأخيرة بحمض هيدروكلوريك تتحلل مائياً إلى مكوناتها الثلاث الرئيسية وهي : قاعدة نيتروجينية – وسكر خماسي – وحمض فسفوريك .

أنواع الأحماض النوويةKinds of Nucleic Acid

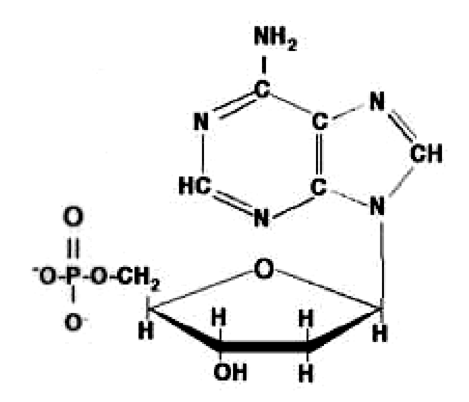
يوجد نوعين من الأحماض النووية كما تقدم..هما:

أ/ الحمض الرايبونيوكلتيدي Ribonucleic Acid (RNA)

ب/ الحمض الديؤكسي رايبونيوكلتيدي Deoxyribonucleic Acid (DNA)

ويتكون البناء الأساسي لهده الأحماض من سلاسل بها جزيئات حمض فسفوريك وسكر بالتبادل ويتصل بكل جزيء من جزيئات السكر قاعدة آزوتية إما من نوع البيورين أو البيرميدين ، والسكر الموجود بجزيء الحمض الرايبونيوكلتيدي (RNA) هو سكر الرايبوز بينما في جزيء الحمض الديؤكسي رايبونيوكلتيدي (DNA) فهو سكر الديؤكسي رايبوز....شكل (1) ، شكل (2)

شكل (1) يوضح هيكل بناء الـ(DNA)



شكل (2) يوضح هيكل بناء الـ (DNA) أو الـ(RNA)

مكونات أحماض النيوكليك :

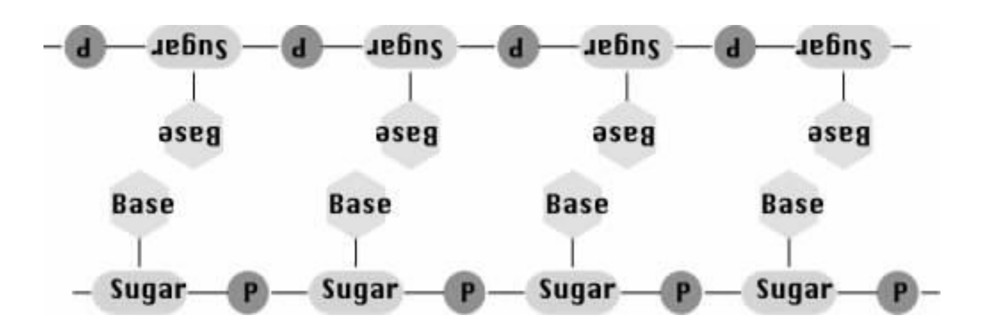
يتكون حمض نيوكليك من ثلاثة أنوع من المركبات كما ذكرنا:

حمض الفسفوريك.

سكر خماسي الكربون وهو سكر الرايبوز أو دي - أوكسي - رايبوز.

وقواعد نيتروجينية تتبع البيورينات أو البيرميدينات ،،،،،شكل(3)

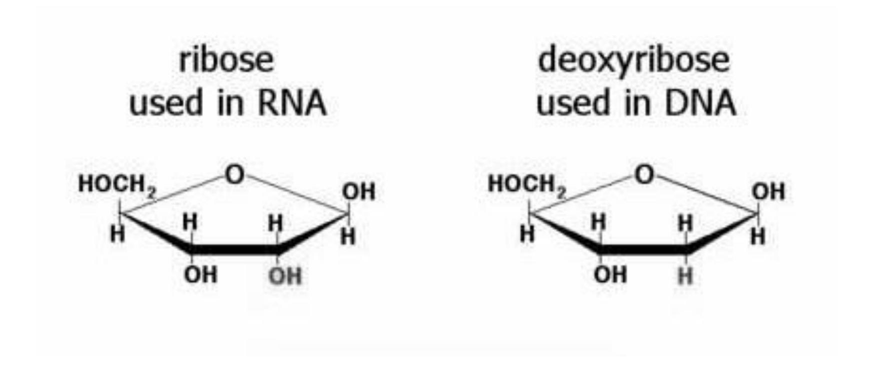
وسوف نتناول كل منهم بشيء من التفصيل...



السكر الخماسي Pentose Sugar

يوجد بأحماض النيوكليك نوعان من السكر الخماسي ، أحدهما هو D- رايبوز ويوجد في حمض (RNA) ، والثاني ديؤكسي رايبوز ويوجد في حمض (DNA) ، شكل (4) وأعطيت ذرات كربون السكر الخماسي الأرقام التالية َ1، َ2 ، َ3، َ4 ،َ5 لتمييزها عن الأرقام المعطاة لذرات الكربون والنيتروجين الموجودة في البيرميدين والبيورين. ومن الخصائص الهامة للسكر الخماسي هو قدرة المجاميع الهيدروكسيلية على تكوين إسترات مع حمض الفسفوريك وخاصة تلك المجاميع الموجودة على الكربون الثالث والكربون الخامس.

شكل (4) يوضح سكر الرايبوز والديؤكسي رايبوز



البيورينات والبيرميدينات Pruines & Pyrimidine

1/قواعد بيورينية: وتنتج من التحام حلقة إيميدازول الخماسية مع حلقة البيرميدين وأهم هذه القواعد.

أدنينAdenine

جوانينGuanine

2/ قواعد بيرميدينية : وهذه القواعد مشتقة من البيرميدين بإستبدال ذرات الهيدروجين الموجودة على كربون رقم 2،4،5 بمجاميع أمينو أوهيدروكسيل أو ميثايل وأهم هذه القواعد:

سيتوزين Cytosine

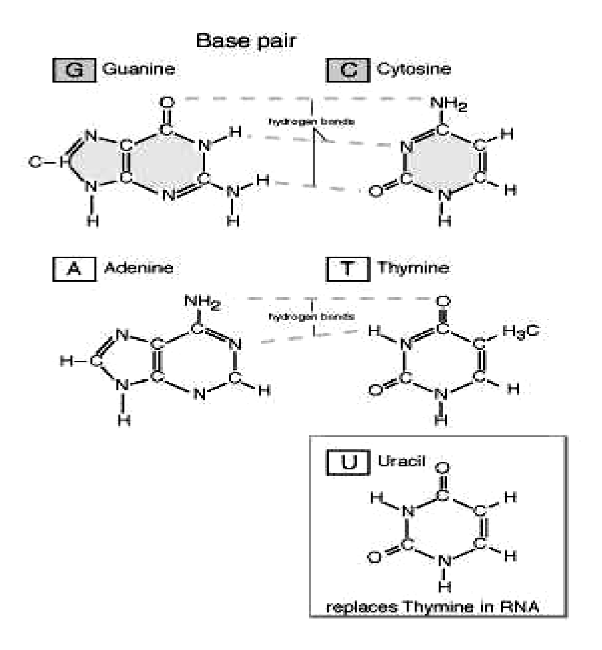
يوراسيل Uracil

ثايمين Thymine

ويحتوي كلاً من الحمضيين النوويين DNA و RNA على القاعدتين الآزوتيتين من البيورين وهما الأدينين Adenine والجوانين Guanine ونجد أيضاً أن كلاً من الحمضيين النوويين DNA و RNA يحتوي على قاعدة آزوتية من نوع البيرميدين وهي سايتوزين Cytosine ولكنهما يختلفان في القاعدة الآزوتية الثانية من نوع البيرميدين فبينما يحتوي الحمض النووي RNA على القاعدة الآزوتية يوراسيل Uracil يحتوي الحمض النووي DNA على القاعدة الآزوتية ثايمين Thymine شكل (5)

شكل (5): يوضح كل من القواعد النيتروجينية (البيورينية والبيرميدينية)

adenine
guanine
cytosine
thymine
uracil



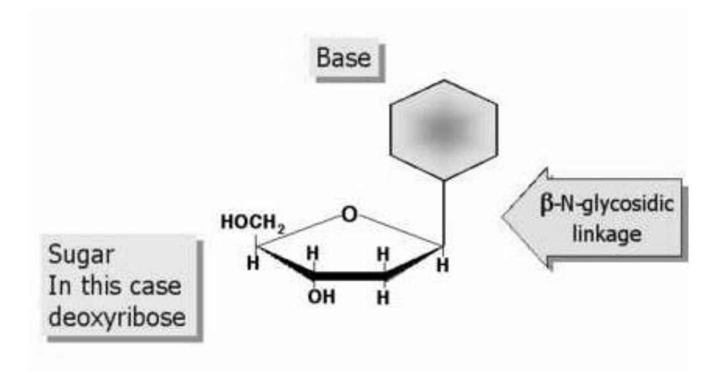
مجموعة الفوسفات Phosphate Group

تربط مجموعة الفوسفات بين مجموعات السكر الخماسية في سلاسل كل من الحمضين (DNA) و (RNA) .

النيوكليوزيداتNucleosides

النيوكليوزيدات هي مركبات ناتجة من اتحاد أحد جزيئات القواعد الآزوتية من نوع البيورين أو البيرميدين مع جزيء السكر بيتا- رايبوز أو بيتا- ديؤكسي رايبوز برابطة جليوكسيدية (بيتا) ، وفيها تتصل القاعدة الآزوتية مع مجموعة هيدروكسيل هيمي أسيتال على ذرة الكربون الأولى للسكر. ومكان اتصال القاعدة الآزوتية بالسكر هو ذرة النيتروجين رقم 9 في البيورينات (الأدينين والجوانين) بينما في البيرميدين فمكان الاتصال مع السكر هو ذرة النيتروجين رقم 1 شكل (6).

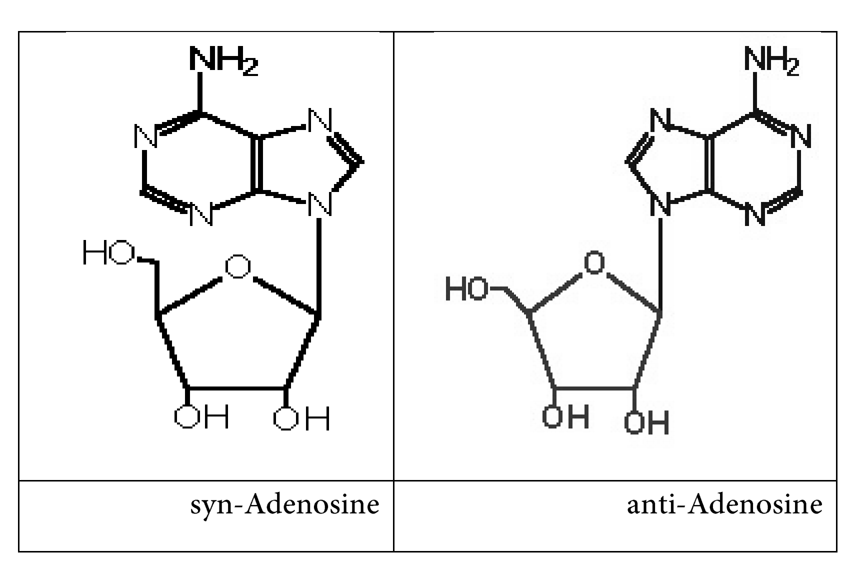
شكل (6) : النيوكليوزيدة



النيوكليتيدات Nucleotides

النيوكليتيدات هي إسترات حمض الفوسفوريك للنيوكلوزيدات وهناك واحدمن أهم النيوكليتيدات الموجودة طبيعياً وهو الأدوينوسين أحادي الفوسفات وهذا المركب(AMP)مع إثنين من مشتقاته وهما أدينوسين ثنائي الفوسفات(ADP)وأدينوسين ثلاثي الفوسفات(ATP)يلعب دوراً هاماً في حفظ الطاقة وفي الإستفادة من الطاقة المنطلقة خلال عمليات التمثيل الغذائي بالخلايا والأهمية الفسيولوجية لهذه المركبات تكمن في قدرتها على إعطاء وإكتساب مجموعات فوسفاتية في التفاعلات البيوكيميائية شكل(7). وتسمى النيوكليوز يدات والنيوكليتيدات تبعاً للقاعدة النيتروجينية الموجوده بها وهناك عدة أنظمة للتسمية موضحة في الشكل (8)

شكل(7)



شكل(8) نظام التسمية للنيوكليوزيدات والنيوكليتيدات

Base Formula	Base (X=H)	Nucleoside X=ribose or deoxyribose	Nucleotide X=ribose phosphate
	Cytosine, C	Cytidine, A	Cytidine monophosphate CMP
	Uracil, U	Uridine, U	Uridine monophosphate UMP

	Thymine, T	Thymidine, T	Thymidine monophosphate TMP
	Adenine, A	Adenosine, A	Adenosine monophosphate AMP
	Guanine, G	Guanosine, A	Guanosine monophosphate GMP

فصل الأحماض النووية Isolation Of Nucleic Acid

تطحن الأنسجة المراد إستخلاص الأحماض النووية منها على درجة حرارة منخفضة (أقل من40 درجة م) وذلك بعد إضافة محلول مائي للفينول المركز وصوديوم لورايل سلفات (أو أي مادة اخرى مناسبة لتقليل الجذب السطحي) إليها .

بعد هذه المعاملة يتغير التركيب الطبيعي للبروتينات الموجودة بالأنسجة وتصبح غير ذائبة في المحلول المائي وترسب بينما نجد أن الأحماض النووية تظل ذائبة في المحلول المائي. وبترك المطحون المتجانس الناتج ينفصل إلى طبقتين سائلتين ويمكن الإسراع بفصل الطبقتين بإجراء عملية طرد مركزي على درجة حرارة منخفضة . حيث يتم بعدها فصل الطبقة العليا المائية (والمحتوية على الأحماض النووية جميعها) عن الطبقة السفلى الأخرى الغنية بالفينول والتي يستغنى عنها.

ترسب الأحماض النووية من الطبقة المائية المفصولة وذلك بإضافة كحول الإيثايل اليها بعد ذلك يفصل الراسب المتكون بواسطة الطرد المركزي . وتنقى الأحماض النووية به بإذابته في الماء ثم إعادة ترسيبه بالكحول كما سبق وفصله بالطرد المركزي على صورة نقية.

ويمكن فصل كل من الحمضين النووين DNA و RNA كل على حدة بعد ذلك إما بمعاملته بإنزيم ريبونيوكليز (Ribonucleasa) وذلك لتكسير الحمض النووي RNA وتحويله إلى جزيئات صغيره ذائبة مع ترك الحمض النووي DNA كما هو بدون التأثير عليه . أو بمعاملة الخليط بإنزيم ديؤكسي ريبونيوكليز (Deoxyribonuclease) حيث تتكسر جزيئات الحمض النووي DNA تاركاً الحمض النووي RNA بدون تأثر .

وبعد التخلص من أحد الحمضين النوويين يضاف محلول مائي للفينول وذلك لترسيب وإزالة ماتبقى من بروتين ثم تفصل الطبقة المائية المحتوية على الحمض النووي المراد الحصول عليه بالطرد المركزي . حيث بضاف لها بعد ذلك كحول الإيثايل لترسيب الحمض النووي.

وحيث أن الحمض النووي DNA على صورته الطبيعية عبارة عن لولب حلزوني طويل فإن إضافة كحول الإيثايل إليه ينتج عنه ترسيب DNA على هيئة راسب طويل ليفي حيث يمكن الحصول عليه من المحلول

بلفه حول محرك زجاجي حيث يوضع بعد ذلك في مذيب مناسب مثل الأسيتون لتجفيفه حيث يسهل إزالته جافاً عن المحرك الزجاجي ويحفظ جافاً في زجاجات على درجة حرارة – 20 درجة م.

وعند استخدام الطريقة السابقه للحصول على الحمض النووي RNA فإننا نحصل على خليط غير متجانس من الأنواع المختلفة للحمض النووي الرايبونيوكلتيدي RNA . وهو الحمض النووي الناقل tRNA والحمض النووي الرسولmRNA والحمض النووي الرايبوسومي rRNA. ولإجراء فصل لكل نوع في هذا الخليط عن الآخر يستخدم لذلك الفصل الكروماتوجرافي على أعمدة من الكيزلجهر المغطى بطبقة من ميثايل الألبومين (MAK) أو بالطرد المركزي على محلول سكروز متدرج التركيز (Sucrose Gradient)

وبإستعمال هذه الطرق يفصل الخليط الى مكونات تبعاً لنوع النسيج الذي استخلصت منه فإذا كان من البكتيريا E.coli مثلاً فإن الخليط سيفصل الى ثلاث مكونات ، المكون الأول هو (tRNA) 4S والثاني 16S والثالث (*)23S وذلك من الحمض النووي RNAوالذي نتج من الرايبوزومات 70S بالبكتيريا بعد أن انقسمت وحداتها الريبوزومية 30S و 50S . بينما في حالة فصل الحمض النووي RNA المفصول من أنسجة الثدييات نحصل على نوعين أحدهما 22S – 18 والآخر 34S – 28 وهذه نتجت من أنواع الرايبوزومات 80S بعد أن انقسمت وحداتها الرايبوزومية40S و 60S .

خواص الأحماض النووية Properties Of Nucleic Acid

تمتص القواعد الآزوتية من نوع البيورين والبيرميدين الموجودة في الأحماض النووية الأشعة الفوق بنفسجية بدرجة كبيرة عند موجة ذات طول 260 نانوميتر (260 nm) . وتستخدم هذه الخاصية لتقدير هذه القواعد الآزوتية كمياً لتقدير نيوكليتيداتها وأيضاً الأحماض النووية الداخلة بتركيبها.

وعلى كل حال فان الحمض النووي DNA له معامل امتصاص نوعي عند طول الموجة 260 نانومتير يقل بمقدار حوالي 35 – 40 % عن معامل الامتصاص النوعي المتوقع من حاصل جمع الامتصاص لك قاعدة (على حدة) من القواعد الداخلة بتركيب الحمض النووي DNA . وهذه النظرية تمسى بنظرية التاثير الهيبوكرومي (Hypochromic)

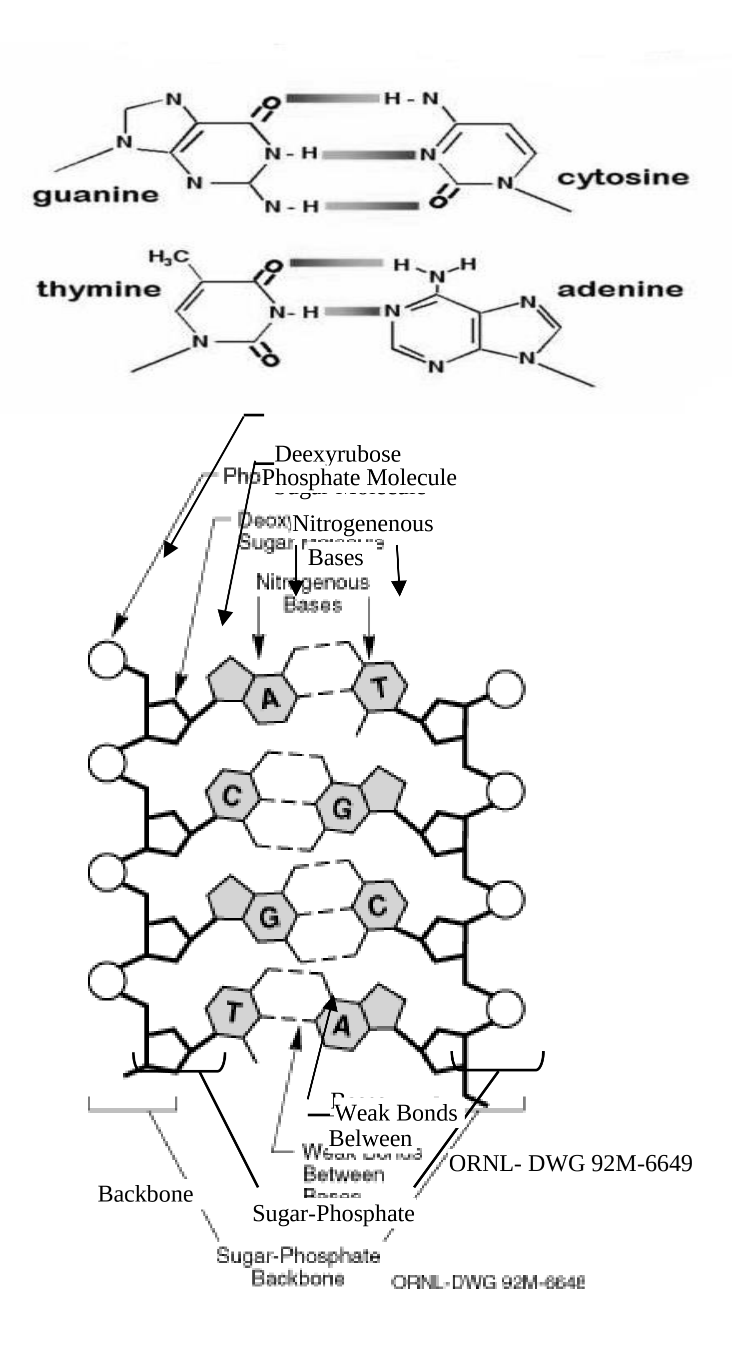
وها الانخفاض في درجة الامتصاص النوعي للاشعة فوق البنفسجية بالنسبة للقواعد الازوتية المتحدة بجزيئات الحمض النووي DNA عن نظيراتها القواعد الحرة نتيجة لتكون روابط هيدروجينية بين القواعد الازوتية المتراكبة الواحد فوق الأخرى في كل من السلسلتين الحلزونيتين للحمض النووي DNA. وهذه الخاصية مفيدة في تقرير درجة الحلزونية (Helicity) للحمض النووي DNA .

وعند تسخين الحمض النووي DNA المبلمر بدرجة كبيرة ببطء فان السلسلتين حلزونيتي الشكل به تبتعدان عن بعضهما وتسمى عملية الابتعاد هذه بعملية انفصال او تشتيت السلسلتين (Melting). وهذا التحول من الشكل الحلزوني ذو السلسلتين الى أي شكل عشوائي يحدث خلال رفع درجة الحرارة عدداً قليلاً من الدرجات ونتيجة لهذا التحول تزداد درجة الامتصاص النوعي. وتسمى درجة الحرارة التي يحدث عندها الزيادة المفاجئة في الامتصاص للأشعة فوق البنفسجية بدرجة حرارة الانفصال (Melting temperature Tm) للحمض النووي .

ولكل نوع من انواع الحمض النووي DNA درجة Tm خاصة به. اما عند اعادة تبريد المحلول ببطء فانه يحدث اعادة لتكوين الشكل الحلزوني ذو السلستين مع امكانية حدوث تبادل بين السلاسل وتسمى هىذه العملية Annealing .

ويلاحظ أن السلسلتين المكونتين للشكل الحلزوني في الحمض النووي DNA متوازيتان ولكنهما معكوستان (Antiparallel) والقواعد الازوتية بهما مزدوجة (Paired) بنظام A مع T و G مع c وهذا التخصص في الازدواج يعتمد على الروابط الهيدروجينية بين القواعد الازوتية فنجد ثلاثة روابط هيدروجينية لكل زوج G - C ورابطتين هيدروجينيتين لكل زوج A – T . انظر شكل (9) و شكل (10) .

شكل (9) نظام الروابط الهيدروجينية



guanine
cytosine
thymine
adenine
Deexyrubose
Phosphate Molecule
Nitrogenenous
Bases
Nitrogenous
Bases
Weak Bonds
Belween
ORNL- DWG 92M-6649
Backbone
Sugar-Phosphate
Sugar-Phosphate
Backbone

شكل (10) يوضح الترتيب الذي تسير عليه القواعد النيتروجينية

```
—A—T—G—C—G—A—T—C—G—A—T—C—G—C—G—C—T—A—T—G—C—A—
 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
—T—A—C—G—C—T—A—G—C—T—A—G—C—G—C—G—A—T—A—C—G—T—
```

ويمكن تشتيت سلسلتي الحمض النووي DNA عن بعضهما إذا انخفض رقمpH المحلول عن4 او اذا ارتفع عن11. حيث أن الأحماض النووية عبارة عن الكتروليتات عديدة (Polyelectrolytes) مع وجود شحنة سالبة واحدة لكل وحدة نيوكليوتيدية (هذه الشحنة ناتجة عن تاين الفوسفات ثنائي الاستر) في نطاق pH من 4 الى 11 . بينما عند pH اقل من 4 نجد ان المجموعات الامينية لقواعد الادنين والجوانين والسيتوزين تكتسب بروتوناً مع تحطم نظم الروابط الهيدروجينية . اما عند pH اعلى من 11 فان بروتونات مجموعات الهيدروكسيل على الجوانين والسيتوزين والثايمين (الناتجة من التغيرات الكيتونية الاينولية Keto – enol tautomers) تنفصل مع تحطم الروابط الهيدروجينية .

أما بالنسبة لتأثير الحرارة على الحمض النووي RNA نجد أن الوضع يختلف لان الحمض النووي RNA المستخلص من معظم المصادر يكون ذو سلسلة مفردة (Single – Stranded) مع وجود أماكن قصيرة بها طيات على نفس السلسلة مكونة أماكن بها ازدواجيات بالسلسلة (Double – Stranded regions) لذا فان شكل المنحنى الخاص بتأثير الحرارة على درجة امتصاصه للضوء فوق البنفسجي (Melting profile) يتميز بزيادة قليلة في الامتصاص عند زيادة الحرارة وهذه الزيادة تكون غير حادة .

ويجدر بالذكر أن الصفات الجينية في عدد قليل من أنواع الفيروسات تحمل على الحمض النووي RNA ذو السلسلتين مزدوجتين وان نظام ازدواج القواعد الازوتية به G – C و A – U .

تركيب حامض الرايبو نيوكليكStructure Of RNA

يكون الـ (RNA) بين 5-10% من الوزن الكلي للخلية وهناك 3 أنواع رئيسية من هذا الحامض النووي :

RNA الرسول (Messenger RNA) .

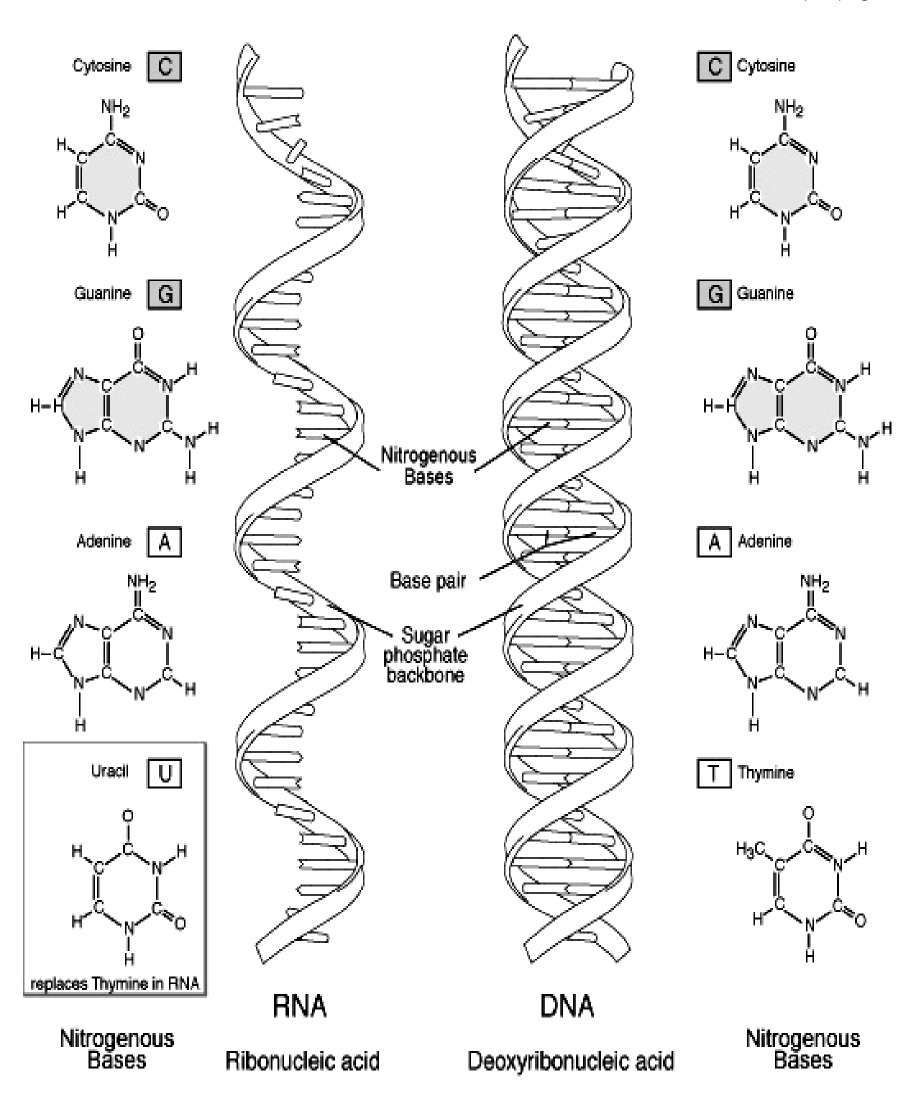
RNA الرايبوسومي (Ribosomal RNA) .

RNA الناقل (Transfer RNA) .

ولكل نوع من الأنواع الثلاثة وزن جزيئي وتركيب خاص به من القواعد النيتروجينية. ويحتوي كلاً من الحمضيين النوويين DNA و RNA على القاعدتين الآزوتيتين من البيورين وهما الأدينين Adenine والجوانين Guanine ونجد أيضاً أن كلاً من الحمضيين النوويين DNA و RNA يحتوي على قاعدة آزوتية من نوع البيرميدين وهي سايتوزين Cytosine ولكنهما يختلفان في القاعدة .

الآزوتية الثانية من نوع البيرميدين فبينما يحتوي الحمض النووي RNA على القاعدة الآزوتية يوراسيل Uracil يحتوي الحمض النووي DNA على القاعدة الآزوتية ثايمين Thymine

شكل (11).



شكل(11): يوضح الفرق بيت الحمض النووي DNA و RNA

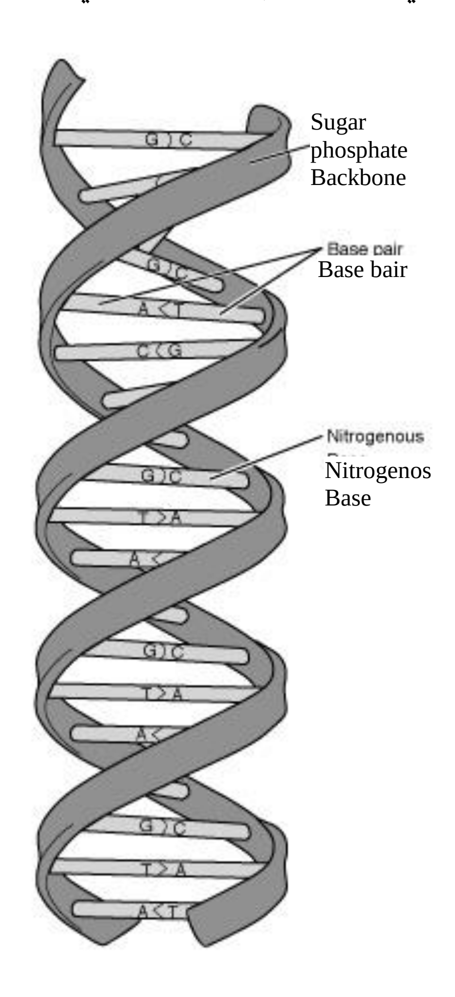
تركيب الحمض النووي الدؤكسي ريبوز Structure Of DNA

لاحظ العالم تشارجاف Chargaff أن نسبة الادنين الى الثايمين تقارب 1 وأيضاً نسبة السيتوزين إلى الجوانين تقارب إلى حد كبير 1 في جزيء الحمض النووي DAN وان هذه النسبة لها اهمية كبيره في ايجاد تركيب هذا الحمض . ولقد وجد بعد ذلك ان نيوكليتيدات الادنين والثايمين يمكن ان تزدوج بواسطة رابطتين هيدروجينيتين بينما السايتوزين والجوانين يمكن ان ينظما بالنسبة لبعضهما بوضع خاص في جزيء الحمض النووي يسمح بتكوين ثلاثة روابط هيدروجينية بينهما شكل(9) و شكل(10) وشكل (11) .

ولقد لاحظ العالم ولكنز Wilkins بانجلترا بستخدام اشعة اكس ان الحمض النووي DNA المستخلص من مصادر مختلفة متماثل الى حد كبير. ومن خلال نتائجه ونتائج العالم تشار جاف اقترح ان جزيء الحمض النووي DAN يتكون من اثنين او اكثر من السلاسل البولي نيوكليتيدية منظمة على شكل حلزوني وان السلاسل البولي ينيوكليتيدية الطويلة تمسك معاً خلال روابط هيدروجينية بين القواعد الازوتية .

وفي عام 1953م وضع العالمان واتسون وكريك Watson & Crick تصميماً لجزيء الحمض النووي DAN شكل (12) وفي اقترح العالمان واتسون وكريك انه يتكون من سلسلتين بولي نيوكليتيديتين ملتفتين حلزونياً (باتجاه اليد اليمنى) وتتكون السلاسل من ديؤكسي - رايبوتيد فوسفات تتصل ببعضهما بواسطة ثنائي استر الفوسفات مع وجود القواعد الازوتية بشكل عامودي على المحور الوسطي لذا نحصل على تركيب خاص للسلسلتين ملتفتين حلزونياً حول محور عام وهذا الحلزون ممسوك معاً بروابط هيدروجينية بين الادينين والثايمين وبين السايتوزين والجوانين وتتخذ السلسلتان وضعاً متعاكساً بالنسبة لبعضهما ، شكل (13).

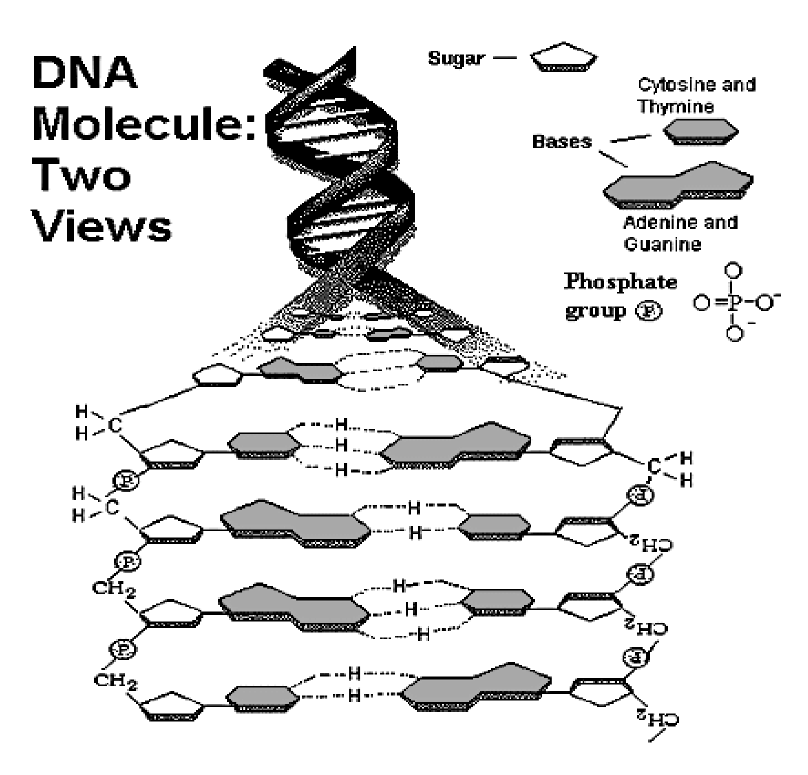
شكل (12) : الشكل الحلزوني ذو السلسلتين للحمض النووي DNA



ونتيجة الدراسات العديدة على أحماض النيوكليك بالأنسجة المختلفة وفي الكائنات الحية المتنوعة اتضح أن كمية DNA الموجودة في نويات الأنسجة المختلفة بأي كائن حي تكون ثابتة ولكنها تختلف من كائن لآخر ، ولم يلاحظ استثناء في هذه القاعدة إلا فيا لخلايا الجنسية التي تكون فردية الكروموسومات وفي هذه الحالة نجد أن كمية DNA الموجودة بها تكون نصف الكمية الموجودة بالخلايا الجسمية ، وفي الخلايا المتعددة الكروموسومات نجد أن كمية DNA تزداد تبعاً لتضاعف العدد الكروموسومي.

وعن طريق التحلل المائي وإستخدام طرق الكروموتوغرافيا المختلفة أمكن فصل القواعد النيتروجينية وتقدير كمية كل منهما ، كما استخدمت طرق أخرى، مثل تحليل منحنى الإنصهار وكثافة الطفو في تقدير كمية الجوانين والسيتوزين معاً ومن هذه الدراسات أمكن تقدير كمية كل من القواعد النيتروجينية في عدد كبير من أحماض الديؤكسي ريبو نيو كليك الموجودة بالكائنات الحية المختلفة.

شكل(13): يوضح تشكيل جزئ الـ DNA



تتابع النيوكليتيدات:

تعتبر طرق تقدير أنواع النيوكليتيدات وكمية كل منها في حمض DNA أسهل بكثير من طرق معرفة تتابع النيوكليتيدات أي ترتيبها في جزئ DNA ويحاول كثير من الباحثين التوصل إلى معرفة تتابع النيوكلتيدات في أحماض النيوكليك المختلفة لما لذلك من أهمية فائقة في فهم الكثير من طرق تنظيم العمليات الحيوية

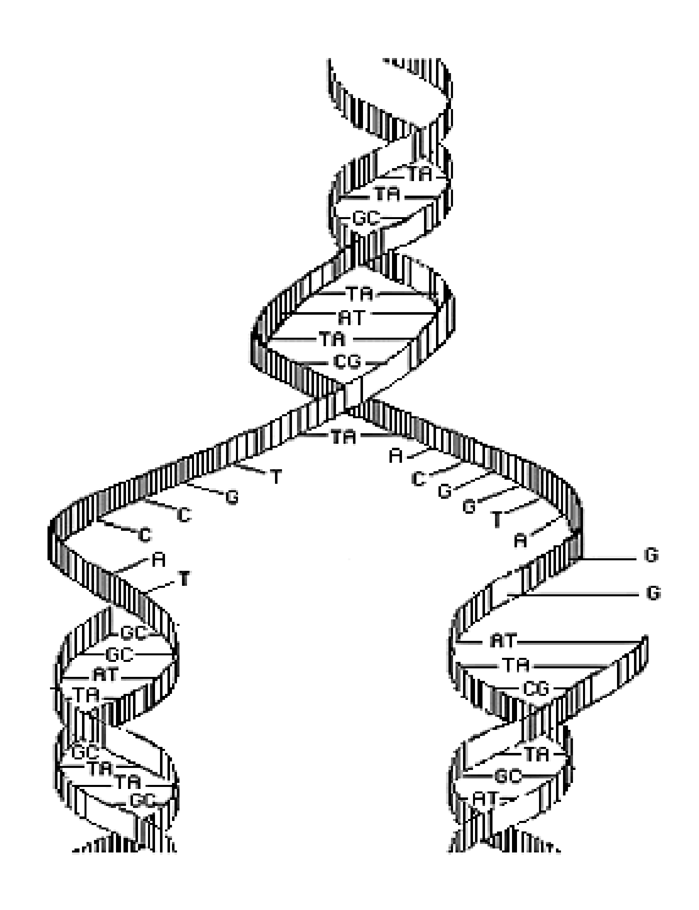
وما يؤدي ذلك إلى إمكان التحكم فيها أو تغييرها. وقد أستخدم في ذلك محموعة من طرق التحلل المائي الحمضي والقاعدي وكذلك التحليل المائي باستخدام أنزيمات مختلفة التخصص ، ومن أهم الطرق المستخدمة في الوقت الحاضر طرق تعتمد على تحليل الجار الملاصق وطرق تعتمد على التهجين مما يوضح البناء الأولي للجزئ.

(طرق تحليل الجار الملاصق) :

وهي تستفيد بما هو معروف عن انزيمات البلمرة الخاصة بالنيوكلتيدات وعن طرق الفصل والتحلل المائي لأحماض الديؤكسي ريبو نيوكليك وعن استخدام النظائر المشعة وقياسها.

(طرق التهجين) :

وتستفيد هذه الطرق بما هو معروف عن (دنترة) أحماض الديؤكسي ريبو نيوكليك بالحرارة ، أي فصل الشريط المزدوج لجزئ DNA الى شرائط مفردة ورجوعها الى طبيعتها بالتبريد البطيء. كما تستفيد بما هو معروف من تقابل القواعد النيتروجينية في أزواج محددة حيث يتقابل الأدينين مع الثايمين ، والجوانين مع السيتوزين ، شكل (14).



شكل(14) : يوضح بداية مرحلة الفصل في جزئ الـ DNA الذي يتم في طريقة التهجين حيث يتم فصل الشريط المزدوج الى شريطين باستخدام الحرارة وارجاعها الى طبيعتها بالتبريد البطيء وبما هو معروف من تقابل القواعد النيتروجينية .

الفصل العشرون

الأسلحة النووية

البيئة والأسلحة النووية... ذلك هو موضوع هذا البحث الذي يُسَلَّط الضوء من خلاله على الأسلحة النووية والدور الذي تلعبه في التأثير على البيئة وتلويثها..أو بمعنى أدق "تدميرها".

وإذ نُورد مصطلح "البيئة" في هذا البحث ، فإننا نعني البيئة بمفهومها الواسع ، باعتبارها مصطلح عام يعبَر عن العناصر الطبيعية والحيوية التي لا دخل للإنسان في وجودها ، بالإضافة إلى العناصر المادية والصناعية التي أوجدها الإنسان ليحاكي بها المجتمع ويحيا على أرض هذا الكوكب. مستشهدين بخصوص ذلك بالتعريف الذي أورده المشرع الأردني من أن البيئة هي "المحيط الذي يشمل الكائنات الحية وغير الحية وما يحتويه من مواد وما يحيط به من هواء وماء وتربة وتفاعلات أي منها وما يقيمه الإنسان من منشآت فيه"(1) ، وقد أكد على هذا التعريف إعلان ستوكهولم لعام 1972 بأن قال بأنها: "كل شيء يحيط بالإنسان"(2) ، حيث تشكل هذه العناصر في مجموعها ما يسمى بالنظام البيئي الذي تتحد فيه جميع العناصر السالفة الذكر وتسير بانتظام واضطراد لتحقق التوازن البيئي.

ثم لا يلبث أن يأتي شبح "التلوث" ملقياً بظلاله فوق النظام البيئي مُفسداً ما فيه من توازن من خلال إحداث خلل أو أكثر في جملة التفاعلات المكونة له. ويمكن تعريف تلوث البيئة بأنه: "أي تغيير في عناصر البيئة مما قد يؤدي بصورة مباشرة أو غير مباشرة إلى الإضرار بالبيئة أو يؤثر سلباً على عناصرها أو يؤثر على ممارسة الإنسان لحياته الطبيعية أو ما يخل بالتوازن الطبيعي"(3) ، مما يحد أو حتى يعدم قدرة البيئة على تجديد مواردها الطبيعية أو تحليل مخلفات الإنسان وناتج نشاطاته المختلفة(4). وبالتأكيد ، هذا كله يؤدي إلى "تدهور البيئة"(5) وليس تلوثها فحسب.

وقد أضحى تلوث البيئة أحد أهم وأكبر المشكلات التي تواجه كوكب الأرض في الوقت الراهن مع العلم بأن تلوث البيئة ليس بوليد اللحظة ، بل هو موجود منذ أكثر من قرن وقد ازداد ظهوره بعد قيام الثورة الصناعية وبعد قيام الحرب العالمية الثانية وما خلفته من دمار. وما زالت آثاره تفتك بالبيئة وتؤدي إلى تدهورها بشكلٍ يفوق قدرتها على ترميم نفسها. الأمر الذي أدى إلى حدوث العديد من الظواهر الغريبة التي يصعب -أو حتى يستحيل- على العلماء والخبراء المتخصصين في كثير من الأحيان إيجاد تفسير منطقي لها ، أو إيجاد حل مناسب لدرء مخاطرها قبل أن تقضي على الكائنات الموجودة على هذا الكوكب. ومثال ذلك ظاهرة الإحتباس الحراري ، وتسارع ذوبان الجليد في قطبَيَ الكرة الأرضية وارتفاع منسوب البحار ، ما يهدد بدمار شامل يحدق بنا خلال العقود القادمة.

هذا بالإضافة إلى تراجع التنوع الحيوي وانتشار العديد من الأوبئة الخطيرة والأمراض المميتة التي لم نسمع بها من قبل ، كجنون البقر وإنفلونزا الطيور ، وآخرهاً إنفلونزا الخنازير!

وبالرغم من أن السبب الرئيسي للتلوث يُعزى إلى ازدياد عدد سكان العالم بشكل هائل -وبالتالي ازدياد النفايات الطبيعية والصناعية- بالإضافة إلى التطور العلمي والصناعي والتقني الذي صاحبه استغلال سلبي للطاقة والمعدات الصناعية والأسلحة الحربية ، إلا أن هناك سبب حقيقي أكبر وأخطر يهدد البيئة ويكاد يكون له دور بارز في جميع أنواع التلوث الأخرى.. إنه "التلوث الإشعاعي" والذي ينتج عن استخدام الطاقة والأسلحة النووية. فالتلوث الإشعاعي يؤدي إلى تلوث الهواء ، التربة ، البحار والمحيطات ، وحتى طبقة الأوزون التي تغلف الأرض. وتكمن خطورة هذا التلوث بأنه لا حدود له ، فما إن وُجِد في منطقة أو حيز ما فسرعان ما سنجده في المناطق المجاورة ومنها إلى المناطق الأبعد. وهذا ما سنتناوله في هذه الدراسة في أربعة فصول. يلقي أولها نظرة عامة على الأسلحة النووية ، بينما يتناول ثانيها الأسلحة النووية وأثرها على البيئة في حالة السلم ، ويليه ثالثها ليبحث ذات الأثر في حالة الحرب. بينما نبحث في التعاون الدولي في مواجهة الأخطار المحدقة بالبيئة بفعل الأسلحة النووية. وفي النهاية ، تقديم لبعض التوصيات والمقترحات البناءة في ذات الموضوع.

الأسلحة النووية يتناول تعريفاً عاماً بالأسلحة النووية وبيان لأنواعها الرئيسية وذلك منه. بينما يتناول كيفية عملها وأبرز مخاطرها.

مفهوم الأسلحة النووية وأنواعها:

تعتبر الأسلحة النووية أحدث أنواع أسلحة الدمار الشامل مقارنةً بالأسلحة البيولوجية والكيميائية ، وهي الأشد فتكاً من بينهم بالكائنات الحية وبالبيئة ككل. كما أن أثارها تتعدى الفترة الزمنية التي يتم استخدامها فيها لتتجاوزها بعشرات السنين غير آبهة بالحدود الجغرافية أو السياسية.

وقد كانت البداية في أوائل القرن الماضي عندما بدأ الإنسان بإكتشاف التركيب الدقيق للذرة 1 ومكوناتها. فبإكتشاف ماهية التفاعلات والحركة داخل الذرة ، وانطلاقاً من مبدأ أن "المادة لا تفنى ولا تستحدث ، بل تتحول من صورة إلى أخرى" ، خطا العالم أولى خطواته على طريق إنتاج الطاقة النووية واستغلالها في الخير والشر على حدِ سواء. فبعد أن كان يتم اللجوء في الحروب والعمليات العسكرية لما يسمى بـ"المتفجرات التقليدية" ، وهي تلك التي تعتمد على حدوث تفاعل كيميائي سريع جداً يتيح للطاقة المصاحبة له أن تتبدد وينجم تكوّن كميات هائلة من الغاز تتمدد بتأثير الحرارة وتدفع ما أمامها مسببة الإنفجار ، وكل ذلك دون أن يطرأ على نواة الذرة أي تغيير يُذكر ،

1 . د. محمد زكي عويس ، أسلحة الدمار الشامل ، سلسلة إقرأ (611) ، دار المعارف ، 1996 ، ص (13).

لم يَعُد هذا النوع من المتفجرات مُجدياً في ظل اكتشاف الطاقة النووية. فتحوّلت الأنظار إلى "المتفجرات النووية" التي تعتمد في انفجارها على طبيعة التغير الذي يطرأ على نواة الذرة ، فإن كان انقساماً في نوى الذرات تولدت عنه الطاقة ، نكون أمام قنبلة نووية. أما إن كان اندماجاً ، فسنكون أمام قنبلة هيدروجينية. وهذان هما نوعان للأسلحة النووية ، ثالثهما هو القنبلة النيوترونية. والمشكلة هي أن التفاعلات النووية تدوم دون توقف فهي تبقى حية لمدة طويلة جداً ، بمعنى أنها تواصل سلسلة من التفاعلات تدوم بدوام وجود اليورانيوم في الذرة 1 .

كيفية عمل الأسلحة النووية ومخاطرها:

لم يكن الإنسان يدرك مدى الخطر المحدق به وبما حوله عندما طوّر الأسلحة النووية واستخدمها لأول مرة. فحتى صانعوها لم يكن لديهم أدنى فكرة عن هول قوتها المدمرة. كان ذلك واضحاً في رد فعل فريق البحث العلمي الأمريكي الذي قام بإجراء أول تجربة تفجير نووي في تاريخ البشرية في صحراء ترينتي للتجارب بولاية نيومكسيكو في 16 تموز 1945. وكان من أبرز أعضاء هذا الفريق العالم الأمريكي يوليوس أوبنهايمر الملقَّب بـ"أبي القنبلة" ، بالإضافة لعدد من علماء الذرة المتخصصين.

1 . د. محمد زكي عويس ، مرجع سابق ، ص (15-14).

وبالرغم من مدى علمهم جميعاً بالذرة وما ينشأ عن تفاعلاتها ، إلا أنهم لدى إجراء التفجير وانطلاق المارد المدمر ، وقفوا مذهولين من هول المنظر ، وصاح "أبو القنبلة" ذاك: "يا إلهي.. ماذا صنعت؟!"[1]. وتتمثل الخصائص التدميرية للقنابل النووية بأنواعها في ثلاثة آثار: الإنفجار ، الحرارة ، والإشعاع. ناهيك عن الغبار الذري[2] والدخان الكثيف اللذان يغمران مكان الإنفجار لسنين عديدة وعلى مساحات شاسعة. فبدءاً بالإنفجار ، فإن الطاقة الناتجة عنه تحوّل المواد المستخدمة إلى غاز وبالتالي ينتج ضغط هائل ورياح شديدة السرعة تتكون نتيجة التمدد المفاجئ. يلي ذلك لمعان وميض وهاج أقوى من ضوء الشمس ، وتصل درجة الحرارة إلى عشرة ملايين درجة مئوية[3]-وهي بذلك أعلى من درجة حرارة باطن الشمس- أما بالنسبة للإشعاع ، فتنطلق موجة قوية عاتية من الإشعاعات المميتة التي تبعثر الأتربة حيث تختلط هذه الأخيرة بها وبالتالي تكتسب خصائصها الإشعاعية وتباشر عملها في التدمير والخراب.

---

1 . موسى زناد ، كابوس الحرب النووية والمصير البشري ، دار القادسية ، بغداد 1985 ، ص (11).

2 . د. محمد زكي عويس ، مرجع سابق ، ص (22) ، الغبار الذري هو: "مجموعات هائلة من الرقائق المشعة المختلفة الحجم والصفات منها ما مصدره مادة القنابل نفسها ومنها أتربة اكتسبت خاصية الإشعاع باندماجها في عمليات التفجير واختلاطها بالإشعاعات أثناء الإنفجار النووي. والغبار النووي قد يبقى عالقاً في الفضاء سنوات عديدة".

3 . د. محمد زكي عويس ، مرجع سابق ، ص (20).

هذا وتتعدد مخاطر تلك الأسلحة العمياء بتعدد أنواعها. فالقنبلة النووية تحوي أشعة كفيلة بإتلاف طبقات الجلد وجعلها تتساقط الواحدة تلو الأخرى ، وإتلاف أنسجة الجسم الداخلية ، بالإضافة إلى أضرار بالغة تفني الكائن الحي بالتدريج ، كالأمراض الوراثية والحروق البالغة والسرطانات وفقر الدم ، هذا إذا انتظرت على الكائن الحي ، ولم تودي به على الفور. أما القنبلة الهيدروجينية ، فبفعل الحرارة الهائلة التي تولِّدها تستطيع تدمير ما يعترض طريقها سواء أكانت كائنات حية أم غير ذلك. يليها القنبلة النيوترونية ، والتي لا تدمر المباني أو المنشآت ، إنما تقتل جميع الكائنات الحية على الفور بفعل الإشعاع المتولد عنها والذي يخترق الأجسام الحية.

الأسلحة النووية وأثرها على البيئة في حالة السلم:

يتناول فيه التجارب النووية وتأثيراتها ، مروراً بآثار التجارب النووية الفرنسية على الأراضي الجزائرية ، وبعض أهم المفاعلات النووية. بينما يتناول في الاستخدامات السلمية للطاقة النووية. يليه التطرق للنفايات النووية وكيفية التخلص منها.

التجارب النووية:

بالرغم من أن الاتجاهات القانونية السائدة في المجتمع الدولي تميل إلى حظر التجارب النووية لما لها من آثار سلبية على البيئة تتسبب بها الإشعاعات النووية الصادرة إما عن التفاعلات النووية نفسها أو عن النفايات النووية التي تخلفها ، إلا أن التطبيق العملي لهذا الحظر يسير بخطىَ بطيئة لا تتناسب في سرعتها مع سرعة وقوة الخطر الذي يتربص بالبيئة مع كل تفاعل نووي أياً كان الغرض منه.

وتختلف التجارب النووية باختلاف الغرض منها. فهناك التجارب النووية العسكرية كتلك التي تُجرى على القنابل النووية للتأكد من مدى تأثيرها وفتكها لغايات استخدامها في الحروب. مثال ذلك القنبلتان النوويتان اللتان تم إلقاءهما على مدينتي هيروشيما وناجازاكي. حيث تم تجريب قنبلة مماثلة وسط صحراء ترينتي في نيومكسيكو قبل ذلك بأقل من شهرٍ واحد ولمّا تأكدت الولايات المتحدة الأمريكية من فاعلية تلك القنبلة سارعت باستخدامها لإجبار اليابان على الإستسلام والرضوخ لها.

كذلك الجزائر كان لها نصيب من التجارب النووية. حيث قامت فرنسا بإجراء (17) تجربة نووية في مطلع الستينات من القرن الماضي في مدينتي "رقان" و "عين إينكر" جنوبي الجزائر.

استغلت فيها فرنسا في ذلك الوقت انتشار الجهل والفقر والبطالة في تلك المناطق ، بل وسَخَّرت حوالي (3500) عاملاً جزائرياً للعمل ليلاً نهاراً لمساعدة الفرنسيين في الإعداد للتجارب النووية وفي تجهيز مكان التفجير وتعبيد الطريق بينه وبين ثكنتهم العسكرية. كانوا يسندون للجزائرين أشق المهام مقارنةً بالعمال الفرنسين الـ (6500) المستخدمين في نفس المشروع. وفي خلال ثلاث سنوات كان كلٌّ شيء جاهزاً للبدء بالتفجيرات.

غداً ستنفجر القنبلة ، فلا يخرج أحد من منزله ، أغمضوا أعينكم ولا تنظروا في السماء. وبلّغوا هذا إلى أهاليكم وجيرانكم".. هذه كانت العبارات التي قالها الفرنسيون للجزائيين في الليلة التي سبقت تفجير القنبلة الأولى صباح يوم 13 شباط 1960.

وعلى الرغم من علم سكان المنطقة بإجراء تجربة نووية وبحصول تفجير في ذلك اليوم إلا أنهم لم يتوقعوا أن يكون مرعباً لهذه الدرجة. كان وقع الإنفجار أضخم مما تخيلوا فقد فاق قوة تفجير هيروشيا بثلاثة أضعاف، زُلزِلَت الأرض واسودت السماء حتى ظن الجزائريون أن الساعة قد حانت. كانت هذه هي البداية للمعاناة التي ما زال سكان تلك المناطق يعانون منها حتى الآن جيلاً بعد جيل. ولم تنتهي التجارب النووية الفرنسية عند هذا الحد ، بل أُجريت ثلاثة تجارب أخرى في نفس المدينة خلال السنتين اللاحقتين للتفجير الأول. انطلقت بعدها فرنسا إلى منطقة "عين إينكر" أقصى جنوبي الجزائر وأجرت فيها (13) عملية تفجير نووية جوفية.

حصدت التجارب النووية الفرنسية في الجزائر عشرات الآلاف من الأرواح ، وتسببت بتشوهات وإعاقات وأمراض لا تزال تتوارثها الأجيال حتى بعد مرور نصف قرن. فبالإضافة لمرض السرطان القاتل ، انتشر العمى والرمد الحبيبي في المنطقة الأمر الذي أدى بالكثيرين لفقد أبصارهم. ومما زاد في حجم الخسائر البشرية أن السلطات الفرنسية جاءت بحوالي (150) أسيراً جزائرياً إلى المنطقة لدراسة أثر الإشعاعات النووية عليهم بعد تفجير قنابل ذات قوى هائلة وصل امتداد إشعاعاتها النووية إلى (700) كم. بالإضافة لحوالي (42) ألف جزائري استُغِّلوا كفئران تجارب خلال التفجيرات التي تمت ما بين شباط وحتى كانون أول لعام 1960. هذا بالنسبة للخسائر البشرية ، أما البيئة ، فلم تسلم هي الأخرى. فقد تسببت تلك التجارب بتغيير مناخ المنطقة وتشوه السلالات الحيوانية وبالتالي تراجع الثروة الحيوانية ، وتدهور التنوع الحيوي. هذا وتراجعت الزراعة والمحاصيل بشكل كبير بسبب احتراق مساحات واسعة من الأراضي بفعل الإشعاعات ، وأضحت الكثير من الأشجار إما عقيمة وإما تنتج ثماراً غريبة الشكل. لتصبح بعدها تلك المناطق عاجزة عن تحقيق الإكتفاء الذاتي لسكانها بعد أن كانت من المناطق المصدرة للحبوب والطماطم والتمور إلى أنحاء العالم.

ولكن ، يبدو أن فرنسا بدأت تشعر مؤخراً بتأنيب الضمير ، حيث قررت مطلع العام الحالي أن تمنح تعويضاً مادياً لأهالي تلك المناطق. إلا أن هذا القرار لم يلقَ الترحيب من قبل الكثيرين ممن لا زال صوت الإنفجار يدوّي في آذانهم حتى الآن ، أو لا زالت أعينهم ترى جمال وجوه أبناءهم وأحفادهم مشوهاً. فليس هناك تعويضاً مادياً من شأنه أن يُنسي هؤلاء الناس المعاناة والدمار اللذان سببتهما لهم فرنسا بعبثها بأراضيهم وأرواحهم.

أما التجارب النووية التي تُجرى لغايات البحوث العلمية والإكتشافات بغرض تطوير استخدام التفاعلات الذرية في توليد الطاقة للاستخدامات السلمية -والتي تتم داخل مفاعلات ومحطات نووية أعدت خصيصاً لهذه الغاية- فهي أيضاً محفوفة بالمخاطر التي تهدد البيئة شأنها في ذلك شأن الأسلحة النووية.

وبين تَضارُب الآراء حول ضرورة إيجاد مصادر طاقة بديلة عن المصادر الطبيعية التي شارفت على النضوب ، وحول تبني خيار استغلال التفاعلات الذرية لتكون هي هذا البديل ، تبقى هذه الأخيرة ناقوس خطر يدق مع كل تفاعل نووي. فالمفاعلات النووية التي تُجرى بداخلها هذه التجارب تظل مهددة طوال الوقت إما بتسرب الإشعاع منها أو بحدوث إنفجار يصاحبه تلوث إشعاعي هائل يبيد البشرية. حتى الدول المتقدمة لم تستطع أن تأمن على نفسها من هذا الخطر عندما داهم مفاعلاتها النووية.

فكان في حادثة التسرب الإشعاعي من محطة "ثري مايل آيلاند" النووية في ولاية بنسيلفينيا الأمريكية في 28 آذار 1979 ما أثار حفيظة العالَم ضد الطاقة النووية بالرغم من أن هذه الحادثة لم تسفر عن خسائر بشرية ، نظراً لأن الخلل الذي حصل في المفاعل أدى إلى انصهار قلب المفاعل فقط دون أن يتعداه إلى المحيط الخارجي. نجم عن ذلك تسرباً إشعاعياً ولكن لحسن الحظ لم ينفجر المفاعل النووي.

لم يكن الحال مشابهاً بالنسبة لروسيا –الإتحاد السوفييتي آنذاك- ففي 26 نيسان 1986 ، أدى الخلل الذي حصل في المفاعل النووي الرابع في محطة "تشيرنوبل" النووية في مدينة أوكرانيا إلى حدوث أسوأ كارثة نووية في تاريخ البشرية أجمع(1). قيل بدايةً أن الحادث نتج عن خطأ في تشغيل المفاعل أثناء إجراء التجربة النووية ، ثم تبين بعد ذلك أنه ناتج عن خطأ في تصميم المفاعل نفسه بالإضافة عدم إحاطة مُشغِّلي المفاعل بكافة خصائصه حيث بقي بعضها طي الكتمان كأسرار عسكرية ؛ وكذلك عدم التقيد التام بتدابير الأمان اللازمة خلال إجراء التجربة وتشغيل المفاعل. علماً بأن هذا المفاعل كان لا زال حديثاً حيث تمت إضافته إلى المحطة النووية قبل ثلاثة أعوام فقط من إنفجاره.

انفجر المفاعل ، وأدى ذلك إلى انبعاث حوالي (7) أطنان من المواد المشعة إلى مساحات شاسعة جداً تخطت المدن الروسية لتصل إلى دول أوروبا ومناطق أخرى من العالم. زاد التلوث الإشعاعي الذي انتشر آنذاك بحوالي (400) ضعف عن التلوث الذي نجم عن تفجير قنبلة هيروشيما.

أصيب الكثيرين بحروقٍ بالغة ، وتغلغل مرض السرطان بأجساد الآلاف من الروس والأوروبيين. غالبية المتضررين كانوا من رجال الإطفاء وأفراد الجيش والعمال الذي هرعوا إلى إخماد ألسنة النار الملتهبة وكُلِّفوا بتنظيف المكان من آثار الإنفجار. لم تُعلمهم السلطات آنذاك بالخطر الموجود بذلك المكان كما لم يتم تزويدهم بأي معدات أو ملابس خاصة للوقاية من الإشعاع. قاموا هؤلاء بجمع مخلفات الإنفجار وإعادتها إلى داخل المفاعل نفسه ليتم بعدها طمره بأطنان من الرمل وبناء هيكل من الصلب فوقه بغرض إحكام إغلاقه.

المئات لقوا حتفهم جراء تعرضهم للإشعاع النووي. حتى الأطفال كان لهم نصيب من ذلك ، حيث تَفَشَّى سرطان الغدة الدرقية لدى حوالي (1800) طفل خلال فترة قصيرة بسبب تلوث غذاءهم باليود المشع. دُمِّرت البيئة المحيطة بالكامل على مساحة (10) كم حول المفاعل وتم إجلاء سكان المناطق المجاورة على مساحة (30) كم حول المفاعل لِيَخلو المكان بعدها من أي أثر للحياة. وبعد فترة من الزمن ، ظهرت بعض النباتات والحيوانات غريبة الشكل مما دفع بالبعض إلى تسمية المكان بـ"غابة العجائب!".

لم تتوقف محطة تشيرنوبل عن العمل بعد الإنفجار ، بل عادت لتشغيل مفاعلاتها الثلاث المتبقية لتعوِّض ما عانته من نقص في الطاقة. ثم لم تلبث أن تخسر مفاعلها الثاني في عام 1991 إثرَ نشوب حريقٍ فيه أدى إلى حصول أضرار لا يمكن إصلاحها. بعدها بأعوام قليلة وتحديداً في عام 1996 تم إغلاق المفاعل الثالث في المحطة بناءَ على إتفاق بين حكومة أوكرانيا والوكالة الدولية للطاقة الذرية. وبقي الحال كما هو عليه حتى عام 2000 عندما أغلق الرئيس الأوكراني المفاعل الأخير بنفسه ، وأُغلقت المحطة بأكملها تماماً.

ولا يسعنا سوى القول بأن المفاعلات النووية تبقى سلاحاً ذو حدين. فبالرغم من أهميتها العظمى في توليد الطاقة الكهربائية والحرارية إلا أنه لا يمكن التنبؤ أبداً باللحظة التي تثور فيها غاضبة لتبيد ما حولها. وللأسف ، ذلك هو ثمن تبني خيار استخدام الطاقة النووية ، الذي لا يقتصر دفعه فقط على من يستخدمونها فعلياً.. بل تُجبر على دفعه البشرية أجمع.

الطاقة النووية واستخداماتها السلمية:

يمكن القول بأن الطاقة النووية سلاحٌ ذو حدين ، فتارةً نجدها قوة مدمرة تجتاح مظاهر الحياة على هذا الكوكب ، وتارةً أخرى نجدها تدعم التقدم الصناعي والتكنولوجي وتغطي احتياجات العالم من الطاقة ،

سواء أكانت طاقة حرارية أم كهربائية. وتزداد أهميتها يوماً تلو الآخر بسبب نضوب المصادر الطبيعية التي كان يعتمد عليها العالم للحصول على حاجته من الطاقة.

وقد استُخدِمت الطاقة النووية لأغراضٍ سلميةٍ عدة ، نذكر منها(1):

استخدام الطاقة النووية في إزالة ملوحة الماء لإنتاج ماء عذب ، ويتم ذلك من خلال محطات نووية تعمل على تحلية مياه البحر بإزالة ملوحتها بتقطيرها عبر عدة مبخرات وميضية. وتعتبر مثل هذه المحطات حلاً عملياً في ظل الظروف الإقتصادية العالمية لكونها لا تحتاج في تشغيلها إلى النفط.

استخدام الطاقة النووية لإنتاج طاقة حرارية ، حيث يتم استغلال الحرارة التي تطردها المحطات النووية لغايات التدفئة وتوليد طاقة حرارية. وقد كانت السويد أول من بادر في هذا المجال مستغلةً المفاعلات النووية لتزويد ما يقارب (50) مدينة من مدنها بالتدفئة والمياه الساخنة صيفاً وشتاءَ.

استخدام الطاقة النووية لإنتاج طاقة كهربائية ، حيث تم تطوير محطات نووية مزدوجة ، أي تنتج طاقة كهربائية وحرارية في آن واحد. وبذلك تسد احتياجات الدول الصناعية المتزايدة للكهرباء.

استخدام الطاقة النووية في محركات السفن والغواصات ، وبدأ ذلك بقيام الولايات المتحدة الأمريكية وللمرة الأولى باستخدام محركات دفع تعمل بالطاقة النووية في أول غواصة ذرية عسكرية عام 1954. توالت بعدها السفن والغواصات وكاسحات الجليد التي تعمل بواسطة هذا النوع من المحركات. وأصبحت تُصَنَّع لدى العديد من الدول كالولايات المتحدة ، روسيا ، بريطانيا ، فرنسا ، ألمانيا واليابان.

استخدام الطاقة النووية في الطائرات والصواريخ النووية(2) ، حيث يمكن تزويد الطائرات النفاثة والصواريخ النووية بمفاعل يتناسب مع حجمها ويزودها بالوقود النووي وبذلك يساعدها على الطيران بسرعة تزيد على سرعة الصوت ولمسافات طويلة جداً مما مكَّن العالم من السفر إلى الفضاء الخارجي.

وتبقى الطاقة النووية على الرغم من عِظَم فائدتها تؤثر سلباً على هذا الكوكب. فبعيداً عن خطر انفجار المفاعلات النووية ، تبقى لدينا مشكلة الفضلات النووية وكيفية التخلص منها.

الفضلات النووية:

لا تنتهي مخاطر الطاقة النووية عند حد استخدامها الفعلي ، سواء أكان سلمياً أم حربياً. بل تتعداه لتبقى متصلة بكل ما ينتج عنها من مخلفات أو فضلات. حيث تحتفظ هذه الفضلات بالخصائص الإشعاعية السامة التي كانت لها منذ بداية التفاعل النووي ، وتستمر في تأثيراتها التدميرية لعشرات السنين.

وقد شكّلت الفضلات النووية أزمة على الصعيد العالمي نظراً لكون التخلص منها بأي طريقةٍ كانت لا يزال يلوّث البيئة ويضر بالكائنات الحية الموجودة ولو على بعد عدة كيلومترات من أماكن هذه الفضلات. وللأسف، لجأت بعض الدول الصناعية المتقدمة إلى طمر نفاياتها النووية -المخزنة في براميل معدة خصيصاً لذلك- في باطن الأرض دون أن تراعي اختيار المكان المناسب لذلك. فكانت دول الشمال المتقدمة تطمر نفاياتها النووية في أراضي دول الجنوب النامية مقابل حصول الأخيرة على الدعم المادي. ولم تستطع عمليات الطمر في باطن الأرض منع مياه الأمطار من التسرب وصولاً إلى تلك النفايات السامة وبالتالي تلويث المياه الجوفية بالإشعاعات الذرية. إضافةً إلى أن هذا يؤثر أيضاً في طبقات الأرض والتربة وبالتالي يؤثر في الثروة النباتية والأراضي الزراعية وفي الثروة الحيوانية كذلك.

البعض الآخر من هذه الدول كان يعمل على إخراج النفايات النووية خارج حدودها تماماً من خلال نقلها على متن سفن خاصة وإلقاءها في مياه سواحل إفريقيا أو البحر الأحمر. أما ما كان أسوأ من ذلك ، فتمثّل في تزييف أشكال ومسميات النفايات النووية التي تم إرسالها من قبل الدول المتقدمة إلى الدول النامية. فعلى سبيل المثال ، تم إرسال رماد من مدينة "فيلادلفيا" الأمريكية إلى "هايتي" على أنه سماد ، وإلى "غينيا" على أنها مواد لصناعة الطوب. بالإضافة إلى شحنة من المبيدات الحشرية منتهية الصلاحية تم إرسالها من قبل شركة أمريكية إلى الهند

وكوريا الجنوبية ونيجيريا على أنها مواد كيميائية نقية. حيث تستغل الدول المتقدمة فقر الدول النامية وديونها المتراكمة لتبادلها بالنفايات النووية السامة التي يدوم مفعولها إلى أمدٍ بعيد.

وقد تكشفت مع مرور الوقت الآثار التدميرية لتلك السموم ، حيث بدأت الأمراض العضوية ، العقلية والنفسية بالظهور ، وبدأت الأشجار تتلف والكائنات الحية تموت. وعندها فقط ، أدركت تلك الدول النامية الخطر الذي ألحقته بسكانها وببيئتها مقابل حفنة نقود.

الأسلحة النووية وأثرها على البيئة في حالة الحرب:

نتعرض فيه لدور محكمة العدل الدولية في مواجهة الأسلحة النووية من خلال الفتوى التي أصدرتها بشأن مشروعية التهديد بالأسلحة النووية أو استخدامها. ثم نُتبِع ذلك بأبرز الكوارث النووية الحربية (هيروشيما وناجازاكي)

دور محكمة العدل الدولية في مواجهة الأسلحة النووية:

"هل التهديد بالأسلحة النووية أو استخدامها في أي ظرف من الظروف يكون مسموحاً به بموجب القانون الدولي؟" كانت هذه هي المسألة التي طرحتها الجمعية العامة للأمم المتحدة أمام محكمة العدل الدولية بعد أن أدركت أن استمرار وجود وتطوير الأسلحة النووية يُعرَض الإنسانية لمخاطر جسيمة ويهدد السلامة الإقليمية لأي دولة. حيث أصدرت المحكمة الموقرة فتواها بهذا الشأن في 8 تموز 1996

لِتُقر بأنه ليس هناك في القانون الدولي العرفي أو الإتفاقي ما يجيز التهديد بالأسلحة النووية أو استخدامها كما لا يوجد أيضاً حظر عام وشامل لذلك. ولكن ينبغي أن يبقى التهديد بالأسلحة النووية أو استخدامها متماشياً مع القوانين الدولية المُطبّقة في حالات النزاع المسلح وبما لا يتعارض مع أحكام ميثاق الأمم المتحدة وإلا كان ذلك غير مشروعاً. كما يجب مواصلة العمل والمفاوضات بشأن نزع السلاح النووي تحت رقابة دولية صارمة(1).

كما سلَّمت المحكمة بأن البيئة مهددة يومياً طالما أن هناك أسلحة نووية. وأكدت على وجود القانون البيئي العرفي عندما نصّت على أن احترام بيئة الدول هو جزء من القانون الدولي المتصل بالبيئة وبالتالي ويجب أخذ ذلك في الحسبان عند السعي لتحقيق الأهداف العسكرية في النزاعات المسلحة(2). هذا وقد أخذت المحكمة الموقرة بعين الإعتبار الخصائص الفريدة للأسلحة النووية وقدرتها على التدمير وإحداث آلامٍ لا حصر لها. بالإضافة إلى إضرارها بالأجيال القادمة كَونها أجهزة تفجيرية تطلق كميات هائلة من الحرارة والطاقة والإشعاع طويل الأمد مما يجعلها أكثر ضرراً من أنواع الأسلحة الأخرى خاصةً أن القوة التدميرية لها لا يمكن احتواؤها مكانياً ولا زمنياً. وتؤثر في الصحة والزراعة والموارد الطبيعية والسكان على مساحات شاسعة.

إضافة إلى أن الإشعاع يضر بالبيئة والأجيال في المستقبل ويتسبب بأمراض وتشوهات جينية(3). مما يؤكد على أن الآثار التدميرية المفرطة التي تخلفها الأسلحة النووية لا تتناسب أبداً مع قيمة الأهداف العسكرية المرجو تحقيقها مهما بلغت هذه الأهداف.

في ضوء هذا القرار أصدر قضاة محكمة العدل الدولية آراءَ متباينة نذكر منها رأي القاضي "فيراري برافو Ferrari Bravo" الذي رأى أنه كان يجدر إعمال قاعدة حظر الأسلحة النووية وإزالتها بكافة أشكالها حيث بُنِيت هذه القاعدة بالأساس على قرارات الجمعية العامة ولكن للأسف حالت الحرب الباردة ومفهوم الردع النووي الذي أوجدته دون تطور هذه القاعدة ، مما ساعد الدول الحائزة لها على الإبقاء عليها.

كذلك القاضي "كوروما Koroma" ، رأى لدى تحليله لبعض الأدلة والدراسات المعنية أن الأسلحة النووية من شأنها أن تُهلك الملايين من الناس دون التمييز بين المدنيين والعسكريين ، وأن تتسبب لمن يظل على قيد الحياة بإصابات بليغة. كما تؤثر بالأجيال القادمة و تُلَوِّث البيئة والغذاء والماء بأشعتها الذرية وبالتالي تمنع عن الأحياء الضرورات الأساسية لبقاءهم. وفي كل ذلك مخالفةً لإتفاقيات جنيف لعام 1949 والبروتوكول الملحق الأول لعام 1977. لذا فاستخدام هذا النوع من الأسلحة أمر غير مشروع.

أما القاضي "ويرامانتري Weeramantry" فأشار بأن استخدام الأسلحة النووية أو التهديد بها أمر غير مشروع أياًّ كانت الظروف نظراً لما فيه من إنكارٍ للإنسانية وانتهاكٍ للقانون الدولي. ويضيف أن عدم وجود معاهدات وقوانين تحظر صراحةً استخدام الأسلحة النووية لا يعني إغفال النظر عن مبادئ القانون الدولي عموماً والدولي الإنساني تحديداً لبيان مشروعية استخدام هذا النوع من الأسلحة المدمرة. من هذه المبادئ نذكر مبدأ "حظر التسبب في معاناة غير ضرورية" ومبدأ "التناسب" ، "التمييز بين المقاتلين والمدنيين" ، "عدم إلحاق الضرر بالدول المحايدة" ، "حظر إلحاق أضرار دائمة وشديدة بالبيئة" ، و"حظر الإبادة الجماعية". بالإضافة لمبادئ قانون حقوق الإنسان. كما لا يمكن تصور وجود نظام قانوني يتضمن أحكاماً تضفي المشروعية على عمل من شأنه تدمير حضارة برمتها يعتبر ذلك النظام جزءاً منها.

أكد كذلك على أن الخصائص الفريدة للأسلحة النووية تجعلها أكثر فتكاً ووحشية من غيرها من الأسلحة. فاستخدامها يؤدي إلى نشر السرطانات والأمراض القاتلة بين الأجيال الموجودة آنذاك والأجيال اللاحقة على مدى عقودٍ طويلة. فنرى التشوهات والأمراض العقلية والوراثية تتغلغل في أجساد الأبناء والأحفاد من سلالات الآباء والأجداد الذي تعرضوا للغبار والإشعاع الذري.

وهذا ليس فقط على صعيد بني البشر بل أيضاً نجد أن الثروة الزراعية والحيوانية تتضرر هي أيضاً فتنتج نباتات وحيوانات غريبة الشكل. سواء في الدول التي تعرضت للكارثة أم في الدول المجاورة لها. كما تتعرض البيئة إلى مستوياتٍ مُهلكة من الحرارة والدخان الكثيف المحمل بالغبار والإشعاع الذري ، الذي قد يتسبب بهطول أمطار نووية سامة.

كوارث الحرب النووية:

بات من البديهي أن يتبادر إلى أذهاننا فور سماعنا لمصطلح "الأسلحة النووية" صور كارثتيّ هيروشيما وناجازاكي(1) ، المدينتان اليابانيتان اللتان تحولتا بما عليهما إلى رماد خلال ثوانٍ معدودة. ففي صباح يوم الإثنين الموافق 6 آب 1945 ، أشرقت الشمس على مدينة هيروشيما ذات السبعة أميال والبالغ عدد سكانها حوالي (480) ألفاً. إلا أن هذا اليوم أبداً لم يكن كسائر الأيام ، بل كان وللأسف يوماً ستذكره اليابان إلى الأبد وهي تبكي آلامه.

حلقت قاذفة القنابل الأمريكية في سماء هيروشيما على ارتفاع منخفض ، وما أن أحكمت الهدف حتى ألقت بقنبلتها النووية التي تزن حوالي (4.5) طن نحوه وانطلقت مبتعدةً بأقصى سرعة. وخلال أقل من دقيقتين على إطلاقها انفجرت القنبلة لتهز المدينة وسط كرة من النار الملتهبة التي بلغت درجة حرارتها (50) مليون درجة مئوية –

أي ما يزيد على ضعف حرارة قلب الشمس- انخفضت بعدها لتصل إلى (300) درجة مئوية ، ثم بدأت تتوالى توابع الإنفجار. فسرعان ما تلبدت السماء بسحابة من الدخان الكثيف الذي تلاه هطول أمطارٍ شديدة مثقلة بالغبار الذري والإشعاعات غطت المدينة على مساحة دائرة قطرها (5) كم ، واختفت المدينة بأكملها في ثوانٍ معدودة. عانى الآلاف من حروق وجروح قاتلة وتساقط الشعر وانعدام الشهية -بسبب التسمم الإشعاعي- وانتشرت على أجسادهم بقع نزفية وتحللت جلودهم. وهؤلاء بالطبع هم ممن كانوا أكثر حظاً من غيرهم بأن كانوا بعيدين قليلاً عن مكان الإنفجار. فمن كان قريباً منه تبخر على الفور بفعل الحرارة الهائلة ، أو قتله الإشعاع الذري الذي كان يعد قاتلاً حتى على مسافة (2) كم من موقعه. حصيلة هذا الدمار شملت (130) ألف قتيل ، ودمار (50) ألف منزل ، وتلاشي أربعة أميال كاملة من مساحة المدينة.

لم تستفق اليابان من ضربتها الأولى حتى تلقت الثانية على مدينة ناجازاكي صباح يوم 9 آب 1945 . كانت الخسائر هذه المرة أقل نسبياً من سابقتها ، ويُعزى ذلك إلى الموقع الجغرافي للمدينة كونها محاطة بالجبال التي امتصت جزء كبير من قوة الإنفجار. ومع ذلك ، بلغ عدد ضحايا تلك الكارثة (69) ألفاً منهم (26) ألف من القتلى. هذا وتُعزى الآلاف من حالات التشوه والأمراض الوراثية وأمراض السرطان المنتشرة حتى وقتنا هذا في مناطق الإنفجارين وما حولهما إلى الإشعاع الذري السام الذي تسببت بها الحرب النووية على اليابان قبل أكثر من نصف قرن.

التعاون الدولي في مواجهة الأخطار المحدقة بالبيئة بفعل الأسلحة النووية:

يبحث في دور المجتمع الدولي في مواجهة الأخطار المحدقة بالبيئة وخصوصاً تلك المرتبطة بالأسلحة النووية. فيتناول نظرة إلى بعض الإتفاقيات الخاصة بحماية البيئة من الأسلحة النووية ، ثم يتحدث عن المناطق الخالية منها.

الإتفاقيات والمعاهدات الخاصة بحماية البيئة من الأسلحة النووية

نحو درء مخاطر وتهديدات الأسلحة النووية عن البيئة ، تضافرت الجهود في المجتمع الدولي لإيجاد الحلول التي تُمكِّن الدول من استغلال الطاقة النووية دون أن تفتك بما حولها. فأُنشِأت اللجان والهيئات المتخصصة بشؤون الطاقة النووية ، وسُنَّت التشريعات وفقاً لقواعد الأعراف الدولية ومقتضيات العدالة. فكان في إنشاء "الوكالة الدولية للطاقة الذرية" عام 1957 إحزار تقدمٍ كبير نحو تحقيق "السلامة النووية" بفرض السيطرة والرقابة على التعامل مع الطاقة النووية ومخلفاتها ، والحد من التسلح النووي للدول.

حيث تعتبر "إتفاقية جنيف لعام 1949 وبروتوكولاتها الأربعة" ، و"إتفاقية لاهاي الخاصة باحترام قوانين وأعراف الحرب البرية لعام 1907" من أبرز بصمات المجتمع الدولي في مجال تطبيق القانون الدولي الإنساني بما فيه حماية للبيئة والبشرية. حيث حُظِرَ استخدام الأسلحة التي تُحدث آلاماً لا مبرر لها ، وقُيِّدت حرية المتحاربين في إختيار وسائل الحرب(1). كذلك كانت معاهدة "حظر وضع الأسلحة النووية

وغيرها من أسلحة الدمار الشامل في قاع المحيطات وفي باطن الأرض لعام 1971" والتي تعهدت أطرافها بعدم تخزين أو رمي الأسلحة النووية أو غيرها في باطن الأرض أو قاع المحيطات. ومنحت الإتفاقية لأي جهةٍ كانت حق الرقابة على ذلك والإحالة إلى مجلس الأمن إذا لزم الأمر. جاءت بعدها إتفاقية "استخدام تقنيات التغيير في البيئة لأغراض عسكرية لعام 1976" وحظرت الاستخدام العسكري أو العدائي للتقنيات التي تُحدِث تغييراً بيئياً واسعاً ، مُفرطاً ، أو طويل الأمد. بل وحظرت حتى مساعدة أي جهة أخرى على ذلك. تلتها إتفاقية "بازل بشأن التحكم في حركة النفايات الخطرة عبر الحدود والتخلص منها لعام 1989" لتُجَرِم المتاجرة بالنفايات الخطرة وتعطي الحق للدول في حظر دخولها إلى إقاليمها(2).

هذا وتبقى الإتفاقيات المبرمة بشأن حماية البيئة سواء من الأسلحة والطاقة النووية ومخلفاتها أو من أي عوامل أخرى ، تبقى كثيرة وعديدة يصعب حصرها جميعاً في دراستنا هذه ، لذا أوردنا بعضاً منها كمثالٍ عليها فقط.

المناطق الخالية من الأسلحة النووية

بالإضافة إلى الإتفاقيات والمعاهدات التي جاءت لتنظم استغلال الأسلحة النووية وكيفية معالجة فضلاتها ، جاءت إتفاقيات أخرى عالجت موضوع الحد من إنتشار الأسلحة النووية في عدد من الدول إما بنزعها منها أو منع بناءها أو منعها من الحصول عليها. وذلك في إطار السعي لوقف سباق التسلح وإنشاء مناطق خالية من الأسلحة النووية. وقد كان ذلك مقابل تمكين تلك الدول من استغلال الطاقة النووية للأغراض السلمية. هذا وجاء "مؤتمر نزع السلاح" في عام 1979 ليجمع تحت رايته مجموعة من اللجان والهيئات المعنية بنزع السلاح ، ليسفر بعدها عن وضع مجموعة من أهم المعاهدات المتعلقة بذات الشأن. نذكر منها:

معاهدة منع التجارب النووية في الفضاء الخارجي وتحت سطح الماء لعام 1963.

معاهدة عدم إنتشار الأسلحة النووية لعام 1968.

معاهدة الحد من التجارب النووية تحت سطح الأرض لعام 1974.

معاهدة التفجيرات تحت سطح الأرض لأغراض سلمية لعام 1976.

معاهدة منع كل التجارب النووية لعام 1996.

أما في الوقت الراهن ، فإن المساعي الدولية تتوجه صَوب إنشاء منطقة خالية من السلاح النووي في الشرق الأوسط أسوةً بالأقاليم أو المناطق التي حققت ذلك بإبرامها معاهدات حظرت تصنيع أو حيازة أو تداول أي من أجهزة التفجير النووية. حيث تم تغطية أمريكا اللاتينية من خلال معاهدة "تلاتيلولكو Tlatelolco" ، ومنطقة جنوب المحيط الهادئ بمعاهدة "راروتونغا Rarotonga" ، أما إفريقيا فأبرمت بشأنها معاهدة "بليندابا Pelindaba". إلا أنه يبدو بأن القرار الذي قدمته جمهورية مصر وتبنته الوكالة الدولية للطاقة الذرية قبل عامين بشأن إقامة منطقة معزولة السلاح النووي في الشرق الأوسط لم يَلقَ ترحيباً من إسرائيل والولايات المتحدة حيث صوتتا ضد هذا القرار ، بينما امتنع الإتحاد الأوروبي عن التصويت ، وصوتت 53 دولة لصالح القرار.

ومع العلم بأن الوكالة الدولية للطاقة الذرية أصدرت العديد من القرارات بشأن إخلاء الشرق الأوسط من الأسلحة النووية ، إلا أن اسرائيل لم تُلقِ لها بالاً وما تزال حتى وقتنا هذا ترفض الإنصياع لها وترفض إخضاع منشآتها النووية للرقابة الدولية. بل وترفض كذلك الإنضمام للمعاهدات المتعلقة بذات الشأن.

توصيات ومقترحات ختامية:

في ختام هذه الدراسة ، نورد بعض التوصيات المقترحة علّها تسهم ولو بالقليل في دعم المساعي والجهود الرامية لجعل هذا الكوكب صحياً ، سليماً ، خالياً من عوامل الدمار والخراب التي تؤدي إلى تآكله شيئاً فشيئاً والتي من أبرزها الطاقة النووية سواء في صورتها الإيجابية أم السلبية.. من ذلك نقول:

إعلامياً: تفعيل دور الإعلام بمختلف وسائله في نشر الوعي البيئي وتثقيف الأمم حول الشؤون البيئية والتهديدات المحدقة بها جراء السلوكيات التي يتبناها الإنسان في تعامله مع محيطه. وتوعية سكان المناطق التي اجتاحتها الكوارث النووية بالأمراض والتشوهات التي قد ترافق سلالاتهم عبر الزمان. كذلك العمل على جعل يوم البيئة – الموافق 5 حزيران من كل عام- يوماً يُسلَّط فيه الضوء على التغييرات البيئية ومسبباتها التي طرأت في العام المنصرم وكيفية مجابهتها في العام الذي يليه.

قانونياً وسياسياً: تبني المزيد من التشريعات على المستويين الوطني والدولي بصورة أكثر جدية وصرامة فيما يخص تنظيم استغلال التفاعلات النووية سلمياً وحربياً ، بحيث تُجبَر –بدلاً من أن تُناشَد- جميع الدول على الإنصياع لها. فوجود المعاهدات الدولية التي تُحَرَم تلك الأسلحة أو تحظر تجربتها أو التهديد بها لا يكفي إن لم تكن جميع دول العالم خاضعة لها بجدية.

وبالتالي فإن سياسة الكيل بمكيالين التي تجبر بعض الدول على نزع أسلحتها النووية بموجب الإتفاقيات الدولية وتفتح الطريق أمام البعض الآخر -وعلى رأسهم إسرائيل- للهروب والتملص من الخضوع لهذه الإتفاقيات لن تُجدي نفعاً على الإطلاق ، بل ربما يكون في ذلك مضيعة للوقت!

رقابياً: تفعيل دور الرقابة والتفتيش من قِبل مُختَلَف الهيئات والوكالات الدولية المختصة بالشكل الذي يشمل جميع الدول دون استثناء ، سواء أكانت تلك التي تمتلك منشآت وأسلحة نووية تمارس من خلالها أخطر الأنشطة وأكثرها دماراً ، أم كانت من الدول النامية والفقيرة التي تسمح مقابل بعض المال بالعبث بأقاليمها لدفن السموم النووية فيها.

وعن الأسلحة النووية نقول.. "إن القنابل النووية ليست أسلحة فحسب بل هي أدوات للإبادة الجماعية.. امتلاكها لا يعني القوة وتكديسها لا يضمن التفوق. استعمالها سيكون جريمة إبادةٍ جماعية بحق المُعتَدَى عليه وانتحاراً للمعتدي.. وليس لدى عالم الطب ما يقدمه إلى الملايين من الجرحى والمصابين لتخفيف آلامهم قبل أن يَلقَوا حتفهم"(1).

الأسلحة النووية.. أسلحة عمياء.. لا تبقي ولا تذر النظر إلى كون الأسلحة النووية بوحشيتها المدمرة تشكل أحد أبرز التحديات البيئية التي تواجه العالم بأسره منذ أكثر من نصف قرن ، فقد وجدنا أن من شأن البحث والكتابة بشأنها إطلاق صيحة توقظ الكثيرين لتنذرهم من هول الدمار الذي حل بهذا الكوكب بفعل ذراتِ دقيقة لا تُرى بالعين المجردة استطاع الإنسان بالعلم أن يكتشف ما بداخلها ولكن للأسف استطاع أيضاً أن يستغلها كوسيلة لإبادة العالم. فهي قد تنفجر بين يديه في أي وقت دون أن تترك له فرصة السيطرة عليها أو حتى الهروب منها.

فتحدثنا عنها في هذه الدراسة ذات الأربعة فصول. ولكونها تتعلق بالتحديات البيئية فكان لا بد من الإشارة أولاً إلى تعريف البيئة بمفهومها الواسع وبالنظام البيئي ككل وبيان ما بينهما من توازن وكيف أنه يختل بفعل التلوث البيئي بأنواعه المختلفة والتي على رأسها "التلوث الإشعاعي" الناجم عن الطاقة النووية ومخلفاتها سواء استُخدِمَت سلمياً أم حربياً. ثم ألقينا نظرة عامة على الأسلحة النووية بأنواعها مع ذِكر مخاطرها على بني البشر والبيئة على حدِ سواء. تطرقنا بعدها إلى الأثر البيئي لإستخدام السلمي للأسلحة النووية. ويُقصد بذلك إجراء التجارب النووية والتعامل مع المفاعلات النووية لإستغلالها في تزويد الدول بالطاقة الحرارية والكهربائية، وكذلك استخدامها كوقود نووي للسفن والطائرات والصواريخ. ثم تحدثنا عن الفضلات النووية كونها تشكل أزمة دولية فيما يتعلق بكيفية التخلص منها ومن تأثيراتها التي تلازمها لعشرات السنين.

جاء بعد ذلك ليبين الآثار البيئية للإستخدام الحربي للأسلحة النووية. فتطرقنا من خلاله إلى دور محكمة العدل الدولية في مواجهة الأسلحة النووية من خلال طرحنا لبعض أهم ما جاء في فتواها بشأن مشروعية التهديد بالأسلحة النووية أو استخدامها لعام 1996. تحدثنا بعدها عن الكوارث النووية التي حدثت في اليابان قبل نصف قرن ولا زالت الشعوب تعاني آثارها حتى الآن. تناول بعدها البحث في دور التعاون الدولي في مواجهة الأخطار البيئية التي تسببها الأسلحة النووية. فذكرنا فيه عدداً من المعاهدات التي أبرمت لتفرض القيود على استخدام الطاقة النووية. وأشرنا إلى دور مؤتمر نزع السلاح بهذا الشأن ومساعيه إلى إنشاء ما يسمى بـ"المناطق الخالية من الأسلحة النووية" حيث تم تطبيق ذلك على بعض الأقاليم ونحن بالإنتظار لأن تطبّق على منطقة الشرق الأوسط.

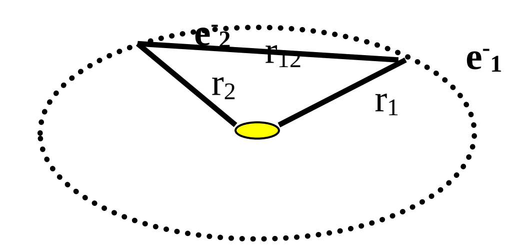
وختاماً أوردنا توصياتنا علّها تسهم ولو بالقليل في عملية إنقاذ هذا الكوكب. ركّزنا فيها على دور الإعلام والقانون والسياسة ، وكذلك الرقابة الدولية في تحقيق الأمن والأمان من خطر الأسلحة النووية.

الفصل الحادى وعشرون

الذرّات متعدّدة الإلكترونات

ذرّة الهيليوم:

بتعدّد إلكترونات الذرّة يصبح المؤثّر الهاميلتوني أكثر تعقيداً ويتعذّر بذلك الحلّ التحليلي المضبوط (exactanalytical solution) ونُضطرّ إلى اللجوء إلى الأساليب التقريبيّة. نعالج في ما يلي أبسط الذرّات متعدّدة الإلكترونات، ذرّة الهيليوم، والتي تحتوي على إلكترونين يدوران حول النواة.



نكتب المؤثّر الهاميلتوني على النحو التالي:

$$\hat{H} = \left(-\frac{h^2}{8\pi^2 \mu}\nabla_1^2 - \frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r_1} \right) + \left(-\frac{h^2}{8\pi^2 \mu}\nabla_2^2 - \frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r_2} \right) + \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r_{12}}$$

يمثّل القوس الأوّل طاقة حركة وطاقة وضع الإلكترون الأوّل –كما أَلِفْناها لإلكترون ذرّة الهيدروجين- ويمثّل القوس الثاني طاقة حركة وطاقة وضع الإلكترون الثاني، أمّا الحدّ الأخير فيمثّل التنافر بين الإلكترونين حسب ما يقتضيه قانون كولوم، ونلاحظ أنّ إشارة الحدّ الأخير هي موجبة لأنّ التنافر يؤدّي إلى زيادة في الطاقة الوضعيّة بخلاف التجاذب الذي يؤدّي إلى نقصان الطاقة الوضعيّة.

في حقيقة الأمر، فإنّ الحدّ الأخير، والذي يمثّل التأثير المتبادل بين الإلكترونات، هو العقبة الحقيقية عند محاولة حلّ معادلة شرودنجر لأنّه يتعذّر بوجوده فصل المتغيّرات. لنفرض أنّ الحدّ الأخير غير موجود (أي لا تنافر بين الإلكترونات)، عندها يصبح المؤثّر الهاميلتوني:

$$\hat{H} = \left(-\frac{h^2}{8\pi^2 \mu}\nabla_1^2 - \frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r_1} \right) + \left(-\frac{h^2}{8\pi^2 \mu}\nabla_2^2 - \frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r_2} \right)$$

يمكننا الآن كتابة الدالّة الموجيّة الكليّة التي تصف إلكتروني ذرّة الهيليوم على شكل حاصل ضرب دالّتين فرعيّتين كلٌّ منهما تصف الإلكترون منفرداً:

$$\psi = \psi_1(x_1, y_1, z_1) \cdot \psi_2(x_2, y_2, z_2) \quad (6.1)$$

وتصبح معادلة شرودنجر على النحو التالي:

$$\begin{aligned}
&\hat{H}\psi = E\psi \\
&\hat{H}(\psi_1 \cdot \psi_2) = E(\psi_1 \cdot \psi_2) \\
&\left[\left(-\frac{h^2}{8\pi^2\mu}\nabla_1^2 - \frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r_1}\right) + \left(-\frac{h^2}{8\pi^2\mu}\nabla_2^2 - \frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r_2}\right)\right](\psi_1 \cdot \psi_2) = E(\psi_1 \cdot \psi_2) \\
&\psi_2\left(-\frac{h^2}{8\pi^2\mu}\nabla_1^2 - \frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r_1}\right)\psi_1 + \psi_1\left(-\frac{h^2}{8\pi^2\mu}\nabla_2^2 - \frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r_2}\right)\psi_2 = E\psi_1 \cdot \psi_2 \\
&\psi_2 E_1\psi_1 + \psi_1 E_2\psi_2 = E\psi_1 \cdot \psi_2 \\
&E = E_1 + E_2
\end{aligned}$$

نستنبط ممّا سبق أنّه في حال انعدام التأثير المتبادل بين الإلكترونات فإنّ المسألة يمكن إرجاعها إلى مسألة ذرّة الهيدروجين، ويكون كلّ إلكترون في الذرّة متعدّدة الإلكترونات كما لو كان إلكترونَ ذرّة هيدروجين، وتنطبق عليه الحلول التي قدّمناها عند الكلام على ذرّة الهيدروجين (وتسمّى بالحلول أو الأفلاك الهيدروجينيّية). في هذه الحال فإنّه يمكن حساب طاقة إلكترونات ذرّة الهيليوم باستخدام المعادلة (5.7):

$$E = E_1 + E_2 = -\frac{\mu Z^2 e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2 n_1^2} + \frac{-\mu Z^2 e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2 n_2^2} = -\frac{\mu \cdot 2^2 \cdot e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2}\left(\frac{1}{n_1^2} + \frac{1}{n_2^2}\right)$$

$$n_1 = n_2 = 1$$

$$E = -108.8\, eV$$

عند مقارنة القيمة المحسوبة أعلاه بالقيمة الحقيقيّة لذرّة الهيليوم في حالة الاستقرار (79 eV-) فإنّنا نجد أنّ الفرقَ كبيرٌ، ممّا يشير إلى أنّ دورَ التنافرِ كبيرٌ في تحديد طاقة الإلكترونات ولا يمكن إهماله، كما نلاحظ أنّ الطاقة ازدادت -كما هو متوقّع- بوجود التنافر.

في حال أخذِ التنافر بين الإلكترونات بعين الاعتبار، فإنّه لا يمكننا أن نعتبر أنّ الدالّة الفرعية الخاصّة بالإلكترون الأوّل مثلاً تعتمد فقط على إحداثيّات الإلكترون الأوّل فقط، بل هي تعتمد كذلك على إحداثيّات الإلكترون الثاني، فموقع الإلكترون الثاني بالنسبة للإلكترون الأوّل يحدّد مقدار التنافر وبالتالي الطاقة الوضعيّة للإلكترون الأوّل. هذا ما نعبّر عنه بعدم القدرة على فصل المتغيّرات:

$$\psi_1 \neq \psi_1(x_1, y_1, z_1)$$

$$\psi_1 = \psi_1(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2)$$

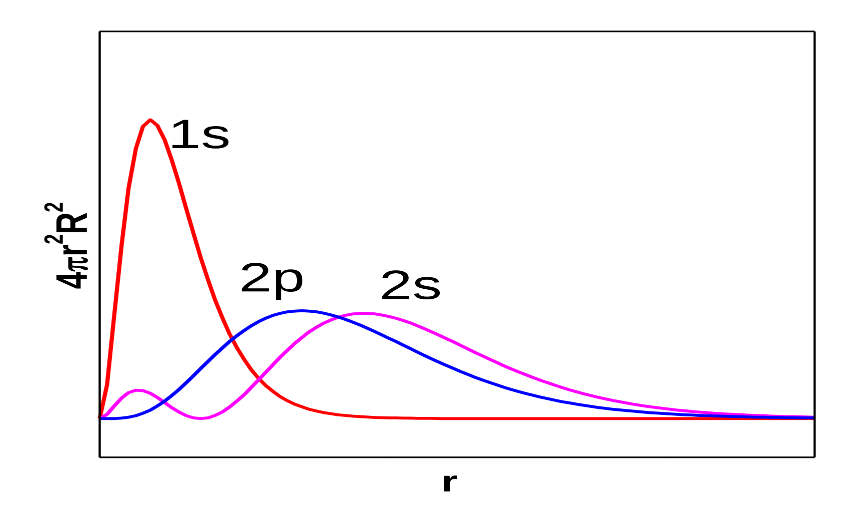
في جميع الأحوال، يمكننا الاستفادة من المعادلة (6.1) كتقريب (approximation) نبدأ منه للوصول إلى الدالّة الفعليّة، متّبعين بذلك بعض الطرق المُقَعَّدة مثل نظريّة التشويش (perturbation theory).

الحجب (shielding) والاختراق (penetration)

تعتمد طاقة الإلكترون في ذرّة الهيدروجين على عدد الكم الرئيس (n) لا غير، أمّا في الذرّات متعدّدة الإلكترونات فالوضع مختلف بعض الشيء إذ يلعب أيضاً عدد الكمّ الثانوي (l) دوراً مهمّاً، فما هو السبب وراء هذا الأمر؟

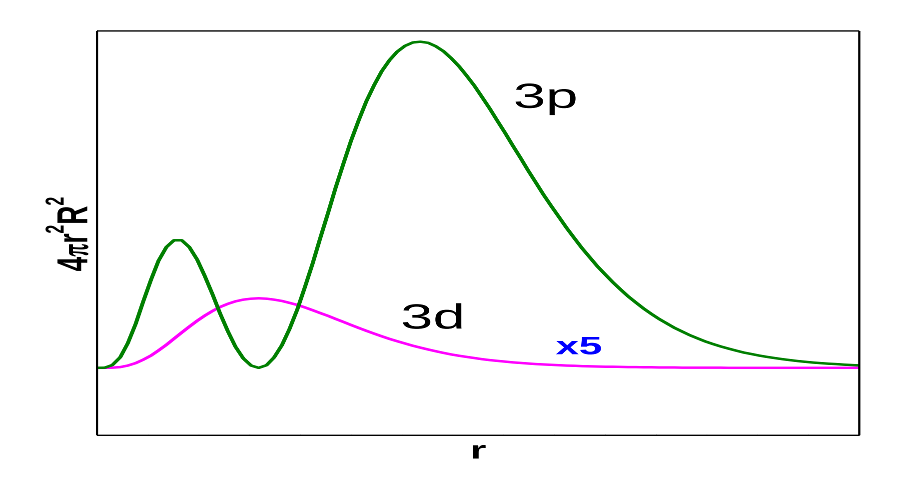
للإجابة على السؤال السابق نتأمّل في ذرّة الليثيوم في حال الاستقرار (1s2 2s1)، ونسأل أنفسنا عن مقدار شحنة النواة التي يحسّها الإلكترون الأخير 2s1. في حال إهمال وجود إلكترونات الفلك 1s فإنّ الشحنة التي سيشعر بها الإلكترون الأخير هي ولا ريب شحنة النواة أي +3. لكنّ وجود إلكترونات الفلك 1s يحجب النواة عن إلكترون الفلك 2s فلا يشعر إلاّ بجزءٍ من شحنة النواة. وعندما يكون الحجبُ كاملاً، فإنّ إلكترون الفلك 2s لا يشعر إلاّ بشحنة مقدارها +1 (عدد البروتونات-عدد الإلكترونات الحاجبة).

عند التأمّل في توزيع الاحتمالية القطريّة للأفلاك المختلفة ندرك أنّ الحَجْبَ لا يكون كاملاً، فإلكترونات الفلك 2s تتداخل مع إلكترونات الفلك 1sمن حيث مكان تواجدها حول النواة، بل وهناك احتمالٌ كبيرٌ بأن تتواجد إلكترونات الفلك 2s قرب النواة (القيمة القصوى الأولى في الرسم أدناه). نَصِفُ هذا التداخل بين إلكترونات الفلكين بأنّه اختراق من إلكترونات



الفلك 2s للفلك 1s. هذا الجزء المُخْتَرِق من إلكترونات الفلك 2s لا يكون محجوباً، ولهذا السبب فإنّ الشحنة التي تشعر بها إلكترونات الفلك 2s ليست +1 وإنّما أكبر من ذلك بقليل (+1.28).

في المقابل فإنّ إلكترونات الفلك 2p أقلّ اختراقاًًًّ للفلك 1s من إلكترونات الفلك 2s وتكون بذلك أكثر احتجاباً من إلكترونات الفلك 2s وتكون بذلك شحنة النواة التي تشعر بها هذه الإلكترونات أصغر من تلك التي تشعر بها إلكترونات الفلك 2s وتبلغ قيمتها +1.02. يدلّ ما سبق أنّ إلكترونات الفلك 2s تنجذب بشدة أكبر إلى النواة من إلكترونات الفلك 2p وبذلك تكون طاقتها الوضعيّة أقلّ من تلك التي تمتلكها إلكترونات الفلك 2p.بنفس المنطق نستبين من الرسم أدناه أنّ طاقة الفلك 3d لا بدّ وان تكون أكبر من طاقة الفلك 3pبسبب ضعف اختراقها للمدار الرئيس الأوّل والثاني (n=1, n=2).



مبدأ عدم التمييز (Indistinguishibility principle)

من المبادئ الأساسيّة التي تفرضها ميكانيكا الكم وتسلّم بصحّتها هي أنّه لا يمكن التمييز بين الإلكترونات المختلفة في الذرّة. لتوضيح هذه الفكرة نتأمّل في ذرّة الهيليوم في حالة الاستقرار (1s2). حيث أنّ الإلكترونين يشتركان في أعداد الكمّ n و l و ml، فهما ولا ريب –حسب ما يقتضيه مبدأ الاستبعاد لباولي (Pauli's exclusion principle)- مختلفان في حركتهما المغزلية، واحد يدور حول نفسه "نحو الأعلى" والآخر يدور حول نفسه "نحو الأسفل". وحسب مبدأ عدم التمييز فإنّنا لا نستطيع القول فيما إذا كان الإلكترون الأوّل هو الذي يدور "نحو الأعلى" والثاني هو الذي يدور "نحو الأسفل"، أو بالعكس. كلّ ما نستطيع أن نحدّده هو أنّ أحدهما يدور "نحو الأعلى" والآخر "نحو الأسفل" ولكنّنا لا نستطيع أن نحدّد أيّهما هو الذي يدور "نحو الأعلى" وأيّهما هو الذي يدور "نحو الأسفل". وفي حقيقة الأمر، هناك احتمال 50% أنّ الإلكترون الأوّل يدور "نحو الأعلى" واحتمال 50% أنّ الإلكترون الثاني يدور "نحو الأعلى"، وكذلك الأمر بالنسبة للدوران "نحو الأسفل".

ولا يقتصر مبدأ عدم التمييز على الحركة المغزلِّية بل يمتدّ ليشمل سائر الصفات الفيزيائيّة، ولنأخذ الطاقة على سبيل المثال. تحتوي ذرّة الليثيوم في حالة الاستقرار (1s2 2s1) على ثلاثة إلكترونات، اثنان لهما نفس الطاقة E1 ويتواجدان في الفلك 1s، والثالث موجود في الفلك 2s وطاقته E2. لا نستطيع –حسب مبدأ عدم التمييز- أن نحدّد أيّ الإلكترونات الثلاثة موجود في الفلك 2s بطاقة قدرها E2 وأيّها موجود في الفلك 1s بطاقة قدرها E1. لو فرضنا أنّ هذه الإلكترونات الثلاثة ملوّنة، أحدها أحمر والثاني أخضر والأخير أزرق، فإنّ هنالك احتمالاً مقداره 33% أن نجد الإلكترون الأحمر في الفلك 2s واحتمالاً مقداره 67% أن نجده في الفلك 1s، وكذلك الأمر بالنسبة للإلكترونين الآخرين.

سنحاول الآن أن نجد التعبير الرياضي المناسب الذي يحقّق مبدأ عدم التمييز لذرّة هيليوم مثارة (1s1 2s1)، ولنبدأ متجاهلين التنافر بين الإلكترونين ممّا يمكّننا من كتابة الدالّة الكلّيّة التي تمثّل إلكترونات الهيليوم على شكل حاصل ضرب الدالّة الهيدروجينيّة للإلكترون الأوّل •••• بالدالّة الهيدروجينيّة للإلكترون الثاني ••••:

$$\psi_{total} = \psi(1) \cdot \psi(2)$$
$$\psi_{total} = \psi_{1s}(1) \cdot \psi_{2s}(2)$$

المشكلة في الدالّة أعلاه أنّها تتجاهل مبدأ عدم التمييز، إذ إنّها تقرّر أنّ الإلكترون الأوّل موجود في الفلك 1s والثاني في الفلك 2s، وتتجاهل بذلك احتمال وجود الإلكترون الأوّل في الفلك 2s والثاني في الفلك 1s. في المقابل، فإنّ الدالة $\psi_{total} = \psi_{1s}(2)\cdot\psi_{2s}(1)$ ليست بأحسن حالاً من الدالّة الأولى وتتعارض كذلك مع مبدأ عدم التمييز. وللتخلّص من هذا المأزق نقوم بعمل تركيبة خطّية من الدالّتين أعلاه تتوافق مع مبدأ عدم التمييز:

$$\psi^{\pm}_{space} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left[\psi_{1s}(1)\psi_{2s}(2) \pm \psi_{1s}(2)\psi_{2s}(1)\right] \quad (6.2)$$

يجدر التنبّه إلى أنّ الثابت $1/\sqrt{2}$ نحصل عليه من شرط العياريّة، أمّا التركيبتان الخطيّتان فيمكن الحصول على إحداهما (ذات الإشارة السالبة) من حل المُحَدِّدة (determinant):

$$\begin{vmatrix} \psi_{1s}(1) & \psi_{1s}(2) \\ \psi_{2s}(1) & \psi_{2s}(2) \end{vmatrix}$$

وبشكلٍ عامّ، نستطيع إيجاد الدالّة الكلّيّة المناسبة لنظامٍ يتكوّن من العدد n من الإلكترونات بحلّ ما يسمّى بمحدّدة سليتر (Slater):

$$\begin{vmatrix} \psi_1(1) & \psi_1(2) & \cdots & \psi_1(n) \\ \psi_2(1) & \psi_2(2) & \cdots & \psi_2(n) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \psi_n(1) & \psi_n(2) & \cdots & \psi_n(n) \end{vmatrix}$$

حيث أنّ الرقم داخل الأقواس يمثّل رقم الإلكترون المعتبر، أمّا الرقم الصغير أسفل رمز الدالة فيمثّل الحلول الهيدروجينيّة لهذه الإلكترونات وعددها n.

مبدأ باولي (Pauli Principle)

نبقى مع ذرّة الهيليوم في الحالة المثارة (1s1 2s1) ونسأل أنفسنا عن عدد التركيبات المختلفة لحركة الإلكترونين المغزليّة في هذه الذرّة؟

E ↑ 2s 1s

$\Psi_{spin,1}=\alpha(1)\alpha(2)$ $\Psi_{spin,2}=\beta(1)\beta(2)$ $\Psi_{spin,3}=\alpha(1)\beta(2)$ $\Psi_{spin,4}=\beta(1)\alpha(2)$

كما يتّضح من الرسم أعلاه فإنّ هناك أربع تركيبات مختلفة ممثّلةً في دالاّت الحركة المغزلية (spin) ‎•spin,4 ... •spin,1‎، إلاّ أنّ الدالّتين ‎•spin,3‎ و ‎•spin,4‎ لا تتفقان مع مبدأ عدم التمييز (وضّح ذلك) لذا وجب استبدالهما بتركيبتين خطّيتين متوافقتين مع هذا المبدأ:

$$\psi_{spin}^{\pm} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left[\alpha(1)\beta(2) \pm \beta(1)\alpha(2)\right]$$

ينصّ مبدأ باولي على أنّ الدالّة الكلّية والتي تتكوّن من حاصل ضرب دالّة المكان (space) ودالّة الحركة المغزليّة (spin) يجب أن تكون غير متماثلة فيما يخصّ عمليّة تبديل الإلكترونات (exchange of electrons). ويكتب هذا المبدأ رياضيّاً على النحو التالي:

$$\hat{P}_{12}\psi_{total} = -\psi_{total}$$
$$\psi_{total} = \psi_{space} \cdot \psi_{spin}$$

حيث أنّ $\hat{P}_{12}$ هو مؤثّر التبديل (exchange operator) وعمله هو وضع الإلكترون الأوّل محِلّ الإلكترون الثاني والثاني محِلّ الأوّل. وعند تشغيل هذا المؤثّر على دالاّت الحركة المغزليّة الأربع نجد أنّ ثلاثة منها متماثلة بالنسبة لعمليّة التبديل أمّا الرابعة فغير متماثلة:

$$\hat{P}_{12}\psi_{spin,1} = \hat{P}_{12}[\alpha(1)\alpha(2)] = \alpha(2)\alpha(1) = \psi_{spin,1}$$
$$\hat{P}_{12}\psi_{spin,2} = \hat{P}_{12}[\beta(1)\beta(2)] = \beta(2)\beta(1) = \psi_{spin,2}$$
$$\hat{P}_{12}\psi^{+}_{spin} = \frac{1}{\sqrt{2}}\hat{P}_{12}[\alpha(1)\beta(2) + \beta(1)\alpha(2)] = \frac{1}{\sqrt{2}}[\alpha(2)\beta(1) + \beta(2)\alpha(1)] = \psi^{+}_{spin}$$
$$\hat{P}_{12}\psi^{-}_{spin} = \frac{1}{\sqrt{2}}\hat{P}_{12}[\alpha(1)\beta(2) - \beta(1)\alpha(2)] = \frac{1}{\sqrt{2}}[\alpha(2)\beta(1) - \beta(2)\alpha(1)] = -\psi^{-}_{spin}$$

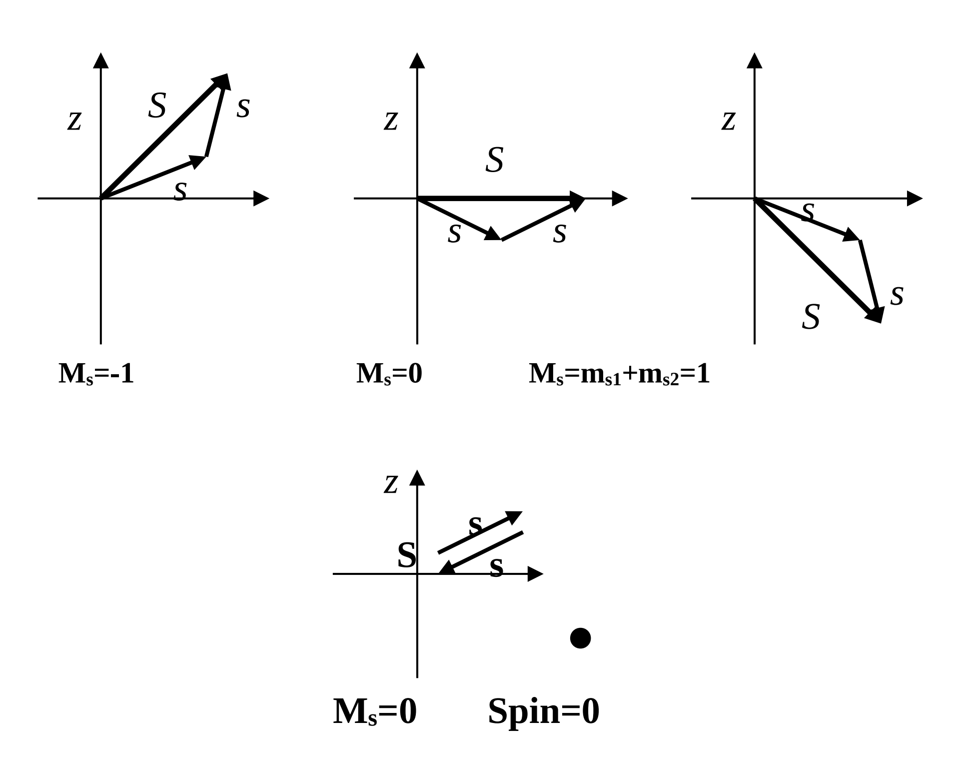
أمّا بالنسبة لدالّتي المكان لذرّة الهيليوم المثارة هذه (المعادلة 6.2)، فالأولى متماثلة في حين أنّ الثانية غير متماثلة فيما يخصّ عمليّة تبديل الإلكترونات:

$$\hat{P}_{12}\psi^{+}_{space} = \frac{1}{\sqrt{2}}\hat{P}_{12}[\psi_{1s}(1)\psi_{2s}(2) + \psi_{1s}(2)\psi_{2s}(1)] = \psi_{1s}(2)\psi_{2s}(1) + \psi_{1s}(1)\psi_{2s}(2) = \psi^{+}_{space}$$
$$\hat{P}_{12}\psi^{-}_{space} = \frac{1}{\sqrt{2}}\hat{P}_{12}[\psi_{1s}(1)\psi_{2s}(2) - \psi_{1s}(2)\psi_{2s}(1)] = \psi_{1s}(2)\psi_{2s}(1) - \psi_{1s}(1)\psi_{2s}(2) = -\psi^{-}_{space}$$

عند ضرب دالاّت الحركة المغزليّة بدالاّت المكان نجد أنّ هنالك أربع احتمالات فقط ينطبق عليها مبدأ باولي:

$$\psi_{total} = \psi^{-}_{space}\psi_{spin,1}$$
$$\psi_{total} = \psi^{-}_{space}\psi_{spin,2}$$
$$\psi_{total} = \psi^{-}_{space}\psi^{+}_{spin}$$
$$\psi_{total} = \psi^{+}_{space}\psi^{-}_{spin}$$

تمثّل الدالاّت الثلاث الأولى ما يسمّى بالحالة الثلاثيّة (triplet state) لذرّة الهيليوم المثارة حيث يكون عدد الكم المغزليّ الكلّي مساوياً لواحد ($S=s1+s2=1/2+1/2=1$)، أمّا الدالّة الأخيرة فتمثّل ما يسمّى بالحالة الأحاديّة (singlet state) حيث يكون عدد الكم المغزلي الكلّي مساوياً لصفر ($S=s1-s2=1/2 - 1/2=0$). ونفهم الآن السرّ وراء هذه التسميات، فهناك ثلاث إمكانيات لتحقيق الحالة الثلاثية ($S=1$) وإمكانيّة وحيدة لتحقيق الحالة الأحاديّة ($S=0$).



يوضّح الرسم الفائت أنّ العزم المغزليّ الكلي (S) لإلكترونات الذرّة متعدّدة الإلكترونات هو المجموع المتّجهي للعزوم المغزليّة للإلكترونات المختلفة، وأنّ عدد الكم المغزلي المغناطيسي الكلّي للذرّة هو مجموع أعداد الكم المغزليّة المغناطيسية للإلكترونات المنفردة:

$$M_s = \sum_i (m_s)_i = (m_s)_1 + (m_s)_2 + \ldots \qquad \vec{S} = \sum_i \vec{s}_i = \vec{s}_1 + \vec{s}_2 + \ldots..$$

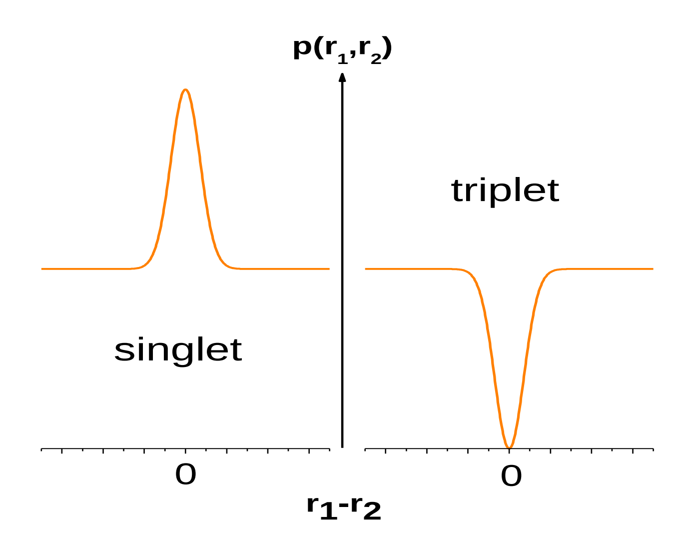
$$s = +\frac{1}{2} \qquad |\vec{s}_i| = \sqrt{s_i(s_i+1)}\frac{h}{2\pi}$$

$$S = s_1 \pm s_2 \pm \ldots. \qquad \ldots..(6.3) \qquad |\vec{S}| = \sqrt{S(S+1)}\frac{h}{2\pi}$$

$$S = 0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, \ldots$$

ولكن يجب التنبّه أنّ العزم المغزليّ الكلي ($|\vec{S}|$) هو قيمة فيزيائيّة مكمّاة، وبذلك يجب على العزوم المغزليّة للإلكترونات المختلفة ($\vec{s}_i$) أن تتّخذ اتجاهاتٍ محدّدة في الفضاء لتعطي عزماً مغزليّاً كلّياً بقيمة محدّدة حسب المعادلة الأخيرة (6.3)، وتسمّى S بعدد الكم المغزلي الكلّي وتأخذ قيماً موجبة صحيحة وأنصاف صحيحة.

وأخيراً تجدر الإشارة إلى أنّ الحالة الثلاثيّة (triplet state) أقلّ طاقةً وبالتالي أكثر استقراراً من الحالة الأحاديّة (singlet state)، ويرجع ذلك إلى أنّ احتمال تواجد الإلكترونين (P) في نفس النقطة (r1=r2) هو صفر وبالتالي مستحيل في الحالة الثلاثيّة، في حين أنّه وارد في الحالة الأحاديّة ممّا يعني أنّ التنافر بين الإلكترونين يكون كبيراً جدّاً في الحالة الأحادية لاحتمال تواجد الإلكترونين بالقرب من بعضهما وهذا التنافر يؤدّي إلى زيادة الطاقة.



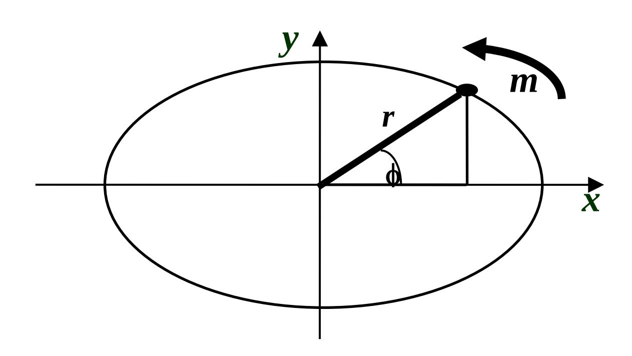
تدريب (1): كيف يمكن حساب احتمال تواجد الإلكترونين في نفس النقطة؟

الحركة الدورانيّة

(Rotational motion)

الجسيم على حلقة (particle- on-a ring)

لنبدأ بأبسط أنواع الحركة الدورانيّة وهي الدوران ثنائي الأبعاد حيث يتحرّك جسم نقطي (point particle) كتلته m بمسار دائري في المستوى x-y حول نقطة المركز.



كلاسيكيّاً، تكون طاقة دوران هذا الجسم $E_{rot} = \frac{1}{2} I \omega^2$ [1]، حيث أنّ • هي السرعة الزاويّة و I•هي عزم القصور الذاتي (moment of inertia)

---

1 يلاحظ التشـــابه بين قوانين الحركة الدائرية والحركة الخطية مع مراعاة اســـتبدال الســـرعة الزاويّة مكان السرعة وعزم القصور الذاتي مكان الكتلة ($E_{kin} = \frac{1}{2} m v^2$).

والذي يمثّل توزيع كتلة الجسم حول محور الدوران. يُعرّف عزم القصور الذاتي على النحو التالي:

$$I = \sum_i m_i r_i^2$$

حيث أنّ mi هي الكتل التي يتألّف منها الجسم الدائر، أمّا ri فهي بُعدُ هذه الكتل عن محور الدوران. وبما أنّنا ندرس حركة جسم نقطي فليس هناك إلاّ كتلة واحدة وعليه فإنّ عزم القصور الذاتي يكون I=mr2.

وبما أنّ الجسم يدور فهو يمتلك بالضرورة عزماً زاوياً (ص 22):

$$L = I\,\omega$$

وعليه فإنّ طاقة الدوران بدلالة العزم الزاويّ هي:

$$E_{rot} = \frac{L^2}{2I} \qquad (7.1)$$

ننتقل إلى ميكانيكا الكم ونبدأ من معادلة شرودنجر ونلاحظ أمرين: الأوّل أنّ طاقة الوضع هي صفر لعدم تواجد الجسم تحت تأثير حقل قوّة، والثاني أنّ الحركة الدورانيّة أعلاه تتمّ في المستوى x-y فلا نحتاج بذلك إلى أخذ البعد z بعين الاعتبار.

$$\left[-\frac{h^2}{8\pi^2 m}\nabla^2 + V(x,y,z)\right]\psi(x,y,z) = E\psi(x,y,z)$$

$$\left[-\frac{h^2}{8\pi^2 m}\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)\right]\psi(x,y) = E\psi(x,y)$$

من العلاقة بين x و y من جهة و r و • من جهة أخرى، نستطيع أن نستنبط أنّ

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2} = \frac{\partial^2}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2}{\partial \phi^2}$$

ولكن حيث أنّ نصف القطر r ثابت خلال عمليّة الدوران أعلاه، فإنّ المشتقّة بالنسبة rل تكون صفراً ويسقط بذلك الحدّان الأوّلان من المؤثر المطلوب لتصبح معادلة شرودنجر على النحو التالي:

$$-\frac{h^2}{8\pi^2 m}\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)\psi(x,y) = -\frac{h^2}{8\pi^2 m}\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2}{\partial \phi^2}\right)\psi(r,\phi) = E\psi(r,\phi)$$

$$-\frac{h^2}{8\pi^2 m r^2}\frac{\partial^2\psi(\phi)}{\partial \phi^2} = E\psi(\phi)$$

$$-\frac{h^2}{8\pi^2 I}\frac{\partial^2\psi(\phi)}{\partial \phi^2} = E\psi(\phi)$$

أمّا الحلّ العامّ للمعادلة التفاضليّة الأخيرة فهو $\psi(\phi) = A\cdot e^{-im\phi}$، حيث أنّ A و m ثوابت. وبتعويض هذا الحلّ في المعادلة الأخيرة نحصل على:

$$\frac{\partial\psi(\phi)}{\partial\phi}=-i\,m\,Ae^{-i\,m\,\phi}=-i\,m\psi \qquad \frac{\partial^2\psi(\phi)}{\partial\phi^2}=+i^2m^2Ae^{-i\,m\,\phi}=-m^2\,\psi$$

$$E=\frac{m^2h^2}{8\pi^2I} \tag{7.2}$$

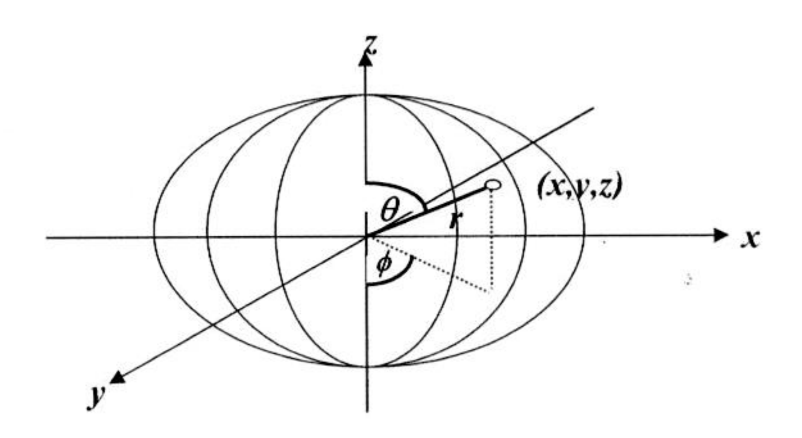
وبمقارنة المعادلة الأخيرة مع المعادلة (7.1) نستطيع أن نحدّد قيمة العزم الزاويّ:

$$L=\sqrt{2\,I\,E_{rot}}=\sqrt{\frac{2\,I\,m^2h^2}{8\pi^2I}}=\frac{m\,h}{2\pi} \tag{7.3}$$

ولا تختلف المعادلة (7.3) عن المعادلة (5.10) فحيث أنّ الحركة الدورانية تحصل في المستوى x-y فإنّ العزم الزاوي سيكون متّجهاً في البعد z (ص 22، ص 88)، وعليه فإنّ L في المعادلة (7.3) ما هي إلاّ Lz، هذا بالإضافة إلى أنّ m هي الأخرى مكمّاة و تأخذ القيم ...m=0, ±1, ±2, ±3 بسبب الشرط $\psi(\phi)=\psi(\phi+2\pi)$ والذي استخدمناه عند حلّ معادلة فاي لإلكترون ذرّة الهيدروجين (ص 78).

الجسيم على سطح كرة (particle-on- a sphere)

لنتأمّل الآن في جسم نقطي ذي الكتلة m يتحرّك على سطح كرة نصف قطرها r دائراً حول مركز الكرة الواقع في نقطة الأصل.



نبدأ بالصيغة العامّة لمعادلة شرودنجر، وحيث أنّ الجسم لا يقع تحت تأثير حقل قوّة فإنّ الطاقة الوضعيّة (V) تكون صفراً. نقوم من ثمّ بنقل المسألة إلى نظام الإحداثيّات الكروي وكذلك بكتابة الدالّة •على شكل حاصل ضرب الدوالّ الفرعية الثلاث R و • و •، كما فعلنا تماماً بذرّة الهيدروجين (ص 76):

$$\left[-\frac{h^2}{8\pi^2 m}\nabla^2 + V(x,y,z)\right]\psi(x,y,z) = E\psi(x,y,z)$$

$$\left[-\frac{h^2}{8\pi^2 m}\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)\right]\psi(x,y,z) = E\psi(x,y,z)$$

$$-\frac{h^2}{8\pi^2 m}\left(\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial}{\partial\theta}\right) + \frac{1}{r^2\sin^2\theta}\frac{\partial^2}{\partial\phi^2}\right)R(r)\cdot\Theta(\theta)\cdot\Phi(\phi)$$
$$= ER(r)\cdot\Theta(\theta)\cdot\Phi(\phi)$$

وبما أنّ بعد الجسم عن مركز الدوران ثابت دوماً (ومقداره نصف القطر r) فإنّ المشتقة بالنسبة لـ r ستكون بالضرورة صفراً، ويسقط بذلك الحد الأوّل من المؤثر لتصبح معادلة شرودنجر على النحو التالي:

$$-\frac{h^2}{8\pi^2 m r^2}\left(\frac{1}{\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial}{\partial\theta}\right)+\frac{1}{\sin^2\theta}\frac{\partial^2}{\partial\phi^2}\right)R(r)\cdot\Theta(\theta)\cdot\Phi(\phi)=E\,R(r)\cdot\Theta(\theta)\cdot\Phi(\phi)$$

$$-\frac{h^2\,R(r)}{8\pi^2 m r^2}\left(\frac{1}{\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial}{\partial\theta}\right)+\frac{1}{\sin^2\theta}\frac{\partial^2}{\partial\phi^2}\right)\cdot\Theta(\theta)\cdot\Phi(\phi)=E\,R(r)\cdot\Theta(\theta)\cdot\Phi(\phi)$$

$$-\frac{h^2\,R(r)}{8\pi^2 m r^2}\left(\frac{1}{\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial}{\partial\theta}\right)+\frac{1}{\sin^2\theta}\frac{\partial^2}{\partial\phi^2}\right)\cdot\Theta(\theta)\cdot\Phi(\phi)=E\,R(r)\cdot\Theta(\theta)\cdot\Phi(\phi)$$

$$-\frac{h^2}{8\pi^2 I}\left(\frac{1}{\sin\theta}\frac{1}{\Theta(\theta)}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial\Theta(\theta)}{\partial\theta}\right)+\frac{1}{\sin^2\theta}\frac{1}{\Phi(\phi)}\frac{\partial^2\Phi(\phi)}{\partial\phi^2}\right)=E$$

$$-\frac{1}{\sin\theta}\frac{1}{\Theta(\theta)}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial\Theta(\theta)}{\partial\theta}\right)-\frac{1}{\sin^2\theta}\frac{1}{\Phi(\phi)}\frac{\partial^2\Phi(\phi)}{\partial\phi^2}=\frac{8\pi^2 I}{h^2}E$$

وبإدخال معادلة فاي (المعادلة 5.4 ص 78) في المعادلة الأخيرة نحصل على

$$\frac{m^2}{\sin^2\theta}-\frac{1}{\sin\theta}\frac{1}{\Theta(\theta)}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial\Theta(\theta)}{\partial\theta}\right)=\frac{8\pi^2 I}{h^2}E$$

وبتأمّل الشقّ الأيسر من المعادلة الأخيرة نجد أنّه ليس سوى الشقّ الأيسر من معادلة ثيتا (المعادلة 5.6 ص 79)، والتي تعطينا

$$\frac{m^2}{\sin^2\theta}-\frac{1}{\sin\theta}\frac{1}{\Theta(\theta)}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial\Theta(\theta)}{\partial\theta}\right)=l(l+1)=\frac{8\pi^2 I}{h^2}E$$

$$E=\frac{h^2}{8\pi^2 I}l(l+1)$$

وكنّا قد تعرّضنا لحلّ معادلة ثيتا عند الكلام على ذرّة الهيدروجين وحلّها يعطينا الدالّة الزاويّة $Y_{lm}=\Theta_{lm}\cdot\Phi_m$ أو ما يُسمّى بالمتوافقات الكرويّة، وتكون قيم الثابتين m و l مكمّاة كما نعرف. ولكن جرت العادة عند بحث موضوع الحركة الدورانيّة استخدام الرمز J بدلاً من الرمز l لأغراض التمييز ومنع الالتباس، فتصبح بذلك معادلة طاقة الدوران على الصورة

$$E_{rot}=\frac{h^2}{8\pi^2 I}J(J+1)=B\,h\,J(J+1)$$

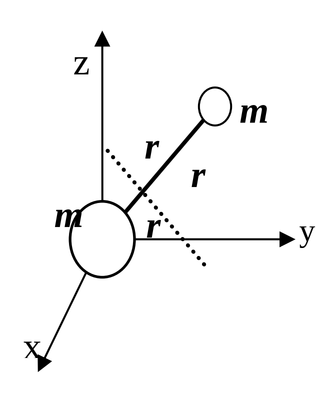
$$B=\frac{h}{8\pi^2 I}$$

ويُسمّى الثابت B بثابت الدوران (rotational constant). وحيث أنّ عدد كمّ الدوران (rotational quantum number) يأخذ القيم ... ,J=0, 1, 2، فإنّ أقلّ قيمة مسموحة لطاقة الدوران هي صفر بخلاف طاقة الاهتزاز أو الطاقة الإلكترونيّة. أمّا العزم الزاويّ فنستطيع حسابه على النحو

$$L = \sqrt{2IE} = \sqrt{J(J+1)}\,\frac{h}{2\pi}$$

الدوّار الصلد (Rigid Rotor)

ونقصد بالدوّار جسماً مركّباً من أكثر من جزء يدور حول نفسه، وأبسط أنواعه الدوّار ثنائي الأجزاء والذي يتكوّن من جسيمين فقط يدوران حول محورٍ يمرّ من خلال مركز ثقل النظام. أمّا كونه صلداً فيعني أنّ أبعاد (dimensions) هذا الدوّار لا تتغيّر مع دورانه حول نفسه فتبقى المسافات بين أجزائه ثابتة، بخلاف الدوّار غير الصلد الذي تزيد المسافة بين أجزائه في اتّجاه نصف قطر الدوران نتيجة القوّة الطاردة المركزية.



وكما قمنا عند معالجة ذرّة الهيدروجين بالاستعاضة عن إحداثيّات النواة والإلكترون بإحداثيّات تمثّل مركز الثقل والبعد بين الجسيمين (ص 75-76)، فإنّنا نفعل نفس الشيء في حال الدوّار أعلاه، ممّا يمكّننا من فصل الحركة الانسحابيّة وتقليص عدد المتغيّرات إلى ثلاثة. وفي حقيقة الأمر، لا تختلف معادلة شرودنجر الخاصّة بهذا الدوّار جوهريّاً عنها في حال ذرّة الهيدروجين والتي تتعلّق هي الأخرى بحركة جسيمين اثنين فقط إلاّ في أمرين اثنين: الأوّل أنّ الطاقة الوضعيّة في الدوّار الصلد هي صفر وتسقط بذلك من الاعتبار، والثاني أنّ المسافة بين الجسيمين الدائرين حول محور الدوران ثابتة وبالتالي تكون المشتقّة بالنسبة لـr كذلك صفراً، وتصبح بذلك معادلة ذرّة الهيدروجين على النحو التالي:

$$\frac{8\pi^2\mu\, r^2 \sin^2\theta}{h^2}E + \frac{\sin\theta}{\Theta(\theta)}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial\Theta(\theta)}{\partial\theta}\right) = -\frac{1}{\Phi(\phi)}\frac{\partial^2\Phi(\phi)}{\partial\phi^2}$$

وبترتيب المعادلة الأخيرة نحصل على معادلة ثيتا وهي نفس المعادلة التي حصلنا عليها في حال الدوران على سطح الكرة (ص 112) وتنطبق بذلك على الدوّار الصلد المعادلتان

$$E_{rot} = \frac{h^2}{8\pi^2 I} J(J+1) = B\,h\,J(J+1)$$

$$L = \sqrt{2\,I\,E} = \sqrt{J(J+1)}\,\frac{h}{2\pi}$$

ويمكننا حساب عزم القصور الذاتي كما يلي:

$$I = \sum_i m_i r_i^2 = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2$$

حيث تمثّل r1 و r2 بعد كلّ من الكتلتين m1 و m2 عن محور الدوران. وإذا أخذنا بعين الاعتبار أنّ محور الدوران يجب أنْ يمرّ في مركز الثقل لضمان عدم تحرّك مركز الثقل وبالتالي انعدام أيّ أثر للحركة الانسحابيّة خلال الدوران، فإنّ بعد الكتلتين m1 و m2 عن محور الدوران هو نفسه بعد الكتلتين عن مركز الثقل والذي يتمّ تعريفه بأنّه النقطة التي يكون عندها مجموع عزوم القوّة (حاصل ضرب القوّة بطول الذراع) أو ما يسمّى بالعزوم الأولى (first momenta) صفراً والذي ينتج عنه أنّ:

$$m_1 r_1 = m_2 r_2$$

ولكن
$$r_1 + r_2 = r_0$$

$$m_1 r_1 = m_2 (r_0 - r_1)$$
$$r_1 (m_1 + m_2) = m_2 r_0$$
$$r_1 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} r_0$$

إذاً
$$r_1 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} r_0$$
$$r_2 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} r_0$$

وبتعويض النتيجة الأخيرة في معادلة عزم القصور الذاتي:

$$I = m_1 \left(\frac{m_2}{m_1 + m_2} \right)^2 r_0^2 + m_2 \left(\frac{m_1}{m_1 + m_2} \right)^2 r_0^2$$
$$I = \frac{m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} r_0^2 (m_2 + m_1) = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} r_0^2 = \mu r_0^2$$

ويمكن الاستفادة من نموذج الدوّار الصلد في وصف الحركة الدورانيّة للجزيئات كما يتّضح من المثال التالي:

تدريب (1): إذا علمت أنّ طول الرابطة في جزيء الأكسجين (O2) هو 120.8 pm فاحسب عزم القصور الذاتي لجزيء الأكسجين، واحسب من ثَمّ العزم الزاوي وطاقة الدوران لجزيء أكسجين في مستوى الطاقة الأوّل (J=1). أين يقع مركز الثقل في جزيء الأكسجين؟

$$m_1 = m_2 = m_O = \frac{M_O}{N_{av}}$$

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} = \frac{m_1^2}{2m_1} = \frac{m_1}{2} = \frac{M_O}{2\,N_{av}} = \frac{15.99491\, g \cdot mol^{-1}}{2 \times 6.02 \times 10^{23}\, mol^{-1}}$$

$$\mu = 1.3285 \times 10^{-23} g = 1.3285 \times 10^{-26} kg$$

$$I = \mu r_0^2 = \left(1.3285 \times 10^{-26} kg\right) \times \left(120.8 \times 10^{-12} m\right)^2 = 1.939 \times 10^{-43} kg\, m^2$$

$$L = \sqrt{J(J+1)}\,\frac{h}{2\pi} = \sqrt{1(1+1}\,\frac{h}{2\pi} = \sqrt{2}\,\frac{h}{2\pi} = 1.486 \times 10^{-34}\, Js$$

$$E_{rot} = \frac{h^2}{8\pi^2 I} J(J+1) = \frac{h^2}{8\pi^2 I} \times 2 = \frac{h^2}{4\pi^2 I} = \frac{(6.6 \times 10^{-34} Js)^2}{4 \times 3.14^2 \times 1.939 \times 10^{-43} kg\, m^2} = 5.696 \times 10^{-26} J$$

أمّا مركز الثقل فسيكون في منتصف المسافة بين الذرّتين:

$$m_1 r_1 = m_2 r_2 \qquad \Rightarrow \qquad m_1 = m_2$$
$$\mapsto \qquad r_1 = r_2$$

وهو أمر معروف سلفاً بالبديهة.

تدريب (2): إذا علمت أنّ طول الرابطة في جزيء 1H-35Cl هو 1.283 Å، فاحسب مكان مركز الثقل. احسب طاقة الدوران لهذا الجزيء في المستوى J=2 واحسب عدد الدورات التي يقوم بها في الثانية الواحدة.

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2$$

$$\omega = \sqrt{\frac{2E}{I}}$$

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi}$$

كيمياء فيزياء البولمرات

نصنف نوعين من البوليمرات من حيث مصادر إنتاجها, هناك البوليمرات الطبيعية و البوليمرات المحضرة:

البوليمرات الطبيعية(Naturel polymers):

هذا النوع من البوليمرات مصدره نباتي يشمل المواد السيليلوزية الموجودة في الخشب و القطن و أشجار المطاط و النباتات بصفة عامة أو حيواني و يشمل الصوف و الجلود و الشعر و الحرير الخ.

البوليمرات المحضرة(Synthetic polymers):

و يشمل هذا النوع من البوليمر المواد البلاستيكية و المطاط الاصطناعي والجلود الصناعية و الأقمشة والنايلون والبولي استر والأصباغ والطلائات والزجاج المعدني والعضوي وغيرها.

هناك ثلاثة أنواع من البوليمرات من حيث البنية الفراغية:

البوليمر الخطي (linear polymer) و البوليمر المتفرع (branched polymer) و البوليمر المتشابك (cross-linked polymer).

البوليمر الخطي تكون فيه وحدات المونمر مرتبطة مع بعضها على شكل خط مستقيم كما في الشكل التالي:

-CH2-CH2-CH2-CH2-CH2-CH2-CH2-CH2-

البوليمر المتفرع تكون فيه و حدات الموئمر مرتبطة مع بعضها على شكل ثلاثي الأبعاد كما في الشكل التالي:

CH2-CH2-CH2-CH2-CH3
|
-CH2-CH-CH2-CH2-CH-CH2-CH2-CH2-
|
CH-CH2-CH2-CH3

البوليمر المتشابك تكون فيه و حدات الموئمر مرتبطة مع بعضها مكونة شبكة ثلاثية الأبعاد كما في الشكل التالي:

-CH2-CH-CH2-CH2-CH2-CH-CH2-CH-
| |
-CH2-CH-CH2-CH2-CH-CH-CH2-CH2-
|
-CH2-CH2-CH2-CH-CH-CH2-CH-CH2-
| |

درجة تبلمر الموئمر:(Polymerization degree)

نعني بدرجة تبلمر الموئمر($\overline{D}p$)معدل عدد الوحدات الموئمرية التي تكون سلسلة البوليمر.

و تحسب كالتالي: إذا كان متوسط الوزن الجزيئي العددي للبوليمر المراد تحديد درجة تبلمره معروف و ليكن $\overline{Mn}$ ووزن المونمر المكون له معروفكذلك و ليكن Maفان درجة تبلمر ($\overline{Dp}$) لهذا البوليمر تساوي:

$$\overline{Dp} = \frac{\overline{Mn}}{M_a}$$

أو أذا كان متوسط طول السلسلة البولمرية معروف ($\overline{\Gamma}$) و طول المونمر معروف كذلك (a) فان $\overline{Dp}$ يساوي:

$$\overline{Dp} = \frac{\overline{\Gamma}}{a}$$

تسمية البوليمرات

تسمى البوليمرات نسبة إلى المونمر المكون لها مثل:

البولي ايثلين (متعدد الايثلين): ويرمز له بالصيغة: -[-CH2-CH2-]n-

تمثل n عدد وحدات الايثيلين التي تكون سلسلة البوليمر و غالبا ما تكون مساوية ل Dp.

البولي ستايرين (متعدد الستايرين) و يرمز له بالصيغة: -[-CH(C6H5)-CH2]n-

البولي أكسيد الايثلين(متعدد أكسيد الايثلين) و يرمز له بالصيغة : -[-CH2-CH2O-]n-

أنواع البلمرة:

نصنف البلمرة على نوعين بلمرة الاضافة و بلمرة التكثف.

2-1. بلمرة الإضافة(Polyaddition)

نعني بالبلمرة الاضافية كل تفاعل متعدد الإضافة لمركب غير مشبع أو حلقي. عندما هذا الأخير لا يحتوي إلا على موقع غير مشبع آو حلقي فان التحويل يؤدي إلى تسلسل خطي ينتهي بتكوين سلاسل بوليمرية طولها يحتوي من 1000 إلى 10000 وحدة مونمرية في كل سلسلة. مثلا الستايرين (C6H5-CH=CH2) حيث جزيئاته تحتوي على مجموعة غير مشبعة فينيلية(Insatured vinyl group) و الأكسيد الاثلين (CH2-CH2O)الذي جزيئاته تكون على شكل حلقي غير متجانس يتبلمران :

$$n \times (C_6H_5 - CH = CH_2) \longrightarrow -[-CH(C_6H_5) - CH_2 -]_n -$$

بلمرة الستايرين

البولي (الستايرين) الستايرين

الوحدة المونمرية هي هنا: -CH(C6H5) –CH2-

و يسمى n درجة التبلمر أو درجة البلمرة و يعني متوسط عدد الوحدات المونمرية المكونة للسلسلة.

بلمرة أكسيد الاثلين (Polymerization of ethylene oxide)

$$n \times (CH_2 - CH_2O) \longrightarrow -[CH_2 - CH_2 - O-]_n -$$

أكسيد الاثلين البولي (أكسيد الاثلين)

السلوكيات العامة لتفاعلات البلمرة

:(general behavior of polymerization reaction)

بصفة عامة, كل مونمر خالي تماما من الشوائب لايتبلمر من تلقاء نفسه عندما يكون محمي جيدا من الضوء و موجود عند درجة حرارة منخفضة. لكن يكفي فقط شائبة حمضية أو قاعدية أو وجود اكسجين مذاب في المونمر حتى تتم البلمرة و التفاعل يكون طارد للحرارة و سريع قد ينجم عنه انفجارا , لهذا السبب ننصح المستخدمين لهذه المواد بإضافة إلى المونمر مثبط (inhibitor) قبل تخزينه أوأثناء نقله من مكان إلى أخر بكمية كبيرة. عند ما يوراد بلمرة هذه المواد يستلزم في هذه الحالة التخلص من هذه المواد بالتقطير تحت ضغط منخفض بعد ذلك يضاف إلى المونمر النقي حافز ما.

و بصفة عامة تفاعل بلمرة الإضافة يلخص كما في المراحل التالية:

البدء

$\boldsymbol{M} \longrightarrow \boldsymbol{M}$ (تفاعل بطيء)

النمو

$M*+M \longrightarrow M_2^*$

$M_2^* + M \longrightarrow M_3^*$ (تفاعل سريع)

$M_i^* + M \longrightarrow M_{i+1}^*$

النهاية

في هذه المرحلة النهاية تكون حسب نوعية الحافز إذا كان الحافز جدرا حرا فالنهاية

تمر باحتمالات عديدة منها:

انتقال الجذر إلى الشوائب

انتقال الجذر إلى المونمر

اتحاد ماكروجزيئتين(two macromolecules) و تكوين جزيء اكبر

انتقال الجذر إلى المذيب

تكوين رابطة مزدوجة على الوحدة الأخيرة للسلسلة

إذا كان الحافز ايونا فالنهاية تكون مختلفة مقارنة مع البلمرة الجذرية و ذلك لان نهايات السلاسل البوليمرية الكربانيونية لا تتفاعل مع بعضها و لهذا السبب لا يوجد في هذا النوع من البلمرة آلية مشابهة لحركية الاتحاد أو الانشطار كالتي تحدث في البلمرة عن طريق الجذور الحرة.

يمكن القول في هذه الحالة إذا كان الوسط التفاعلي خاليا تماما من الشوائب التي يمكن أن تتفاعل مع الماكروايون(macroion) فان هذه البلمرة لا تكون لها مرحلة نهائية و البوليمرات الناتجة عنها تسمى "بوليمرات حية" .

في حالة إضافة حمض في نهاية التفاعل فالبلمرة تنتهي ببوليمر كامل التفاعل.

لكي نتمكن من معرفة آلية بلمرة الإضافة بالتدقيق نتطرق إلى دراسة كل نوع منها:

2-2-1. البلمرة عن طرق الجذور الحرة

:(Free radical polymerization)

هذا النوع من البلمرة يعتمد على حوافز قادرة على تكوين جذور حرة عند درجات حرارة معتدلة مثل البايروكسيدات و الازونيتريلات أما المونمرات القادرة على التبلمر بهذه الحوافز هي مركبات فينيلية (vinylic compounds) تحتوي أساسا على مجموعة ساحبة للالكترونات (electroatractive)

مثل: الستايرين(styrene) و الاكريلات(acrylates) و المثاكريلات (methacrylates) واحماضها والفينايل كلوريد (vinylchloride) و الاكرلمايد (acrylamide) الخ.

وآلية هذه البلمرة تمر كما ذكرناه أنفا بمراحل ثلاثة هي:

البدء (initiation)

تكون مرحلة البدء كالتالي:

تكوين الجذور الحرة:

$$A_2 \xleftarrow{\Delta/h\gamma} 2A^*$$

تتم هذه المرحلة إما بالتسخين آو بالإشعاع كالفوق البنفسجي UV radiation

تكوين المركز النشط:

$$A^* + M \longrightarrow A - M^*$$

(المركز النشط)(active center)

النمو(propagation)

في هذه المرحلة يتم نمو السلسلة بإضافة مونمر تلو الأخر على المركز النشط كالتالي:

$$A - M^* + M \longrightarrow A - M - M^*$$

مرحلة تكوين الماكرو جدر(macroradical)

$$A-M_2^{*}+\boldsymbol{n}\times M \longrightarrow A-M_{n+2}^{*}$$

(الماكرو جدر-macroradical)

النهاية (termination)

في هذا الطور يكتمل نمو السلاسل البوليمرية كالتالي:

1- إما بالتحويل أيالماكروجدر(macroradical) يتشبع باقتلاع ذرة (بشكل عام ذرة هيدروجين أو ذرة هالوجين) من جزيء موجود في الوسط التفاعلي كجزيئات المذيب أو جزيئات الشوائب أو جزيئات المونمر أو من البوليمر نفسه كما هو موضح في الشكل التالي:

$$R-M_i^{*}+H-T \xrightarrow{(transfert)} R-M_i-H+T^{*}$$

(ماكروجزيء غير نشط) (عامل التحويل - transfer agent)

في هذه الحالة عامل التحويل يبطل فعالية الماكروجزيء (macromolecule) وباستطاعته بدء نمو سلسلة بوليمرية جديدة كما هو في الشكل:

$$T^{*}+M \longrightarrow T-M^{*}$$

تفاعلات التحويل في هذا النوع من البلمرة لا ينقص من عدد المراكز النشطة و لا يؤثر على حركية البلمرة و لكن بما انه يوقف النمو الطبيعي لسلاسل البوليمر في نفس الوقت يبتدئ نمو سلاسل جديدة يقلل من طول السلاسل و يؤثر على وزنها الجزيئي و توزيعه.

2- إما باتحاد سلسلتين متجاورتين و تكوين سلسلة أطول كما في الشكل التالي:

CH3- CHX-[CH2-CHX]m-CH2-CHX-CH* + *CH2- CHX-[CH2-CHX]p-CH3

2-2-2.البلمرة الانيونية (anionic polymerization)

البلمرة الانيونية يكون فيها المركز النشط (active center) أنيون وبصفة خاصة كربنيون (carbanion)عندما يكون المونمر أليفين(olefin). من بين الحوافز التي باستطاعتها تكوين مراكز نشطة نذكر منها: المواد القوية القوية بمفهوم برونشتد(Bronsted) وتمر هذه البلمرة كما في البلمرة عن طريق الجذور الحرة بالأطوار التالية:

البدء

إن أليفين ما يمكن تنشيطه بتفاعله مع قاعدة بمفهوم برونشتد (-B) أو بآلية إرجاع أحادي الإلكترون(monoelectronic) .

$$B^{(-)} + CH_2 = CH(A) \longrightarrow B - CH_2 - (A)HC^{(-)}$$

(مونمر على شكل كربانيون منشط)

الكربانيون المكون هو عبارة عن جسيم يحتوي على كربون يحمل زوج من الالكترونات الحرة.

القاعدة (-B) يمكنها أن تكون:

ايون الهايدروكسيل(-OH) الناتج عن انشطار KOH أو NaOH في الأوساط المائية بحيث لا يتفاعل مع المجموعة الوظيفية (A) للمونمر مثل CH2=C(CN)2 .

ايونات الالكوكسايل (alcoxyle) او الفاينوكسايل (phenoxyle) .

ايون الامايديور(-NH2) المتكون في الامونيا المميئة(NH4OH) بانشطار الامايديور.

كربنيون محرر((-)R) في وسط خامل كالهايدروكربون(hydrocarbon) و الايثر(ether) المكونة من انشطار المواد العضومعدنية(organometallic) مثل: -R Li , R-Mg-X كالتالي:

$$R-Li \longrightarrow R^{(-)} + Li^{(+)}$$

$$R-Mg-X \longrightarrow R^{(-)} + Mg(X)^{(+)}$$

الإرجاع الأحادي الالكترونات (monoelectronic reduction)

المعادن الكثيرة الإرجاع كالقلويات يمكنها الإرجاع بالتحويل إلى أحادي لالكترونات الاليفينات الحاوية على مجموعة مستبدلة (A) (substituent group) ساحبة للالكترونات.

$$B^{(-)}......Me^{(+)} + CH_2 = CH(A) \longrightarrow B-^{*} CH_2 - (A)HC^{(-)}, Na^{(+)}$$

أنيون جدر(Anion radical) ايون المعدن

في هذه الحالة نتحصل على أنيون جدر الذي لا يمكث طويلا في هذه الوضعية كي يتحول باتحاده مع أنيون جدر أخر إلى ثنائي الكربانيونdicarbanion( ) حسب المعادلة التالية:

$$2\times[CH_2-(A)HC^{(-)}.....Na^{(+)}] \longrightarrow Na^{(+)}....^{(-)}CH(A)-CH_2-CH_2-(A)HC^{(-)}....Na^{(+)}$$

(داي كربانيون- dicarbanion)

النمو.

نمو السلاسل البوليمرية في هذا النوع من البلمرة يتم عبر تفاعلات متتالية من النوع التالي:

$$\boldsymbol{B}-CH_2-(A)HC^{(-)}....Me^{(+)}+CH_2=CH(A)\longrightarrow B-CH_2-CH(A)-CH_2-(A)HC^{(-)}....Me^{(+)}$$

داي مر منشط (dimer actived) موثمر منشط (monomer actived)

و بصفة عامة إذا كان M يمثل الموثمر يمكن كتابة مرحلة النمو كالتالي:

$$B-M^{(-)\cdot}...Me^{(+)}+M\longrightarrow B-M-M^{(-)}....Me^{(+)}$$

$$B-M_i-M^{(-)}....Me^{(+)}+M\longrightarrow B-M_{i+1}-M^{(-)}....Me^{(+)}$$

في كل خطوة يتم إدخال موثمرM بين الانون (-)M و الكاتيون(+)Me المعدني.

النهاية.

من البديهي أن النهايات الكربانيونية للسلاسل البوملرية المتكونة في المرحلة السابقة لا تتفاعل مع بعضها لبعض وبما ان هذا النوع من البلمرة يقتضي العمل في وسط خاليا تماما من الشوائب فالمرحلة النهائية في هذه الحالة غير موجودة و البوليمر الناتج يسمى "بوليمر حيا"(Live polymer) إلافي حالة إضافة قليل من مركب حامضي في هذه المرحلة فيتم تعديل الكربانيون والحصول على بوليمر ميت أو مكتمل. نعني بالبوليمر الحي تفاعله من جديد في حالة إضافة الموثمر إليه.

3-2-2. البلمرة الكاتيونية (Cationic polymerization)

البلمرة الكاتيونية للاليفينات تتم بتكوين مراكز نشطة كربوكاتيونية و تمر كما في البلمرة الانيونية بالمراحل التالية:

البدء

في هذا النوع من البلمرة التفاعلات يمكن أن تبدأ باستعمال الحوافز المختارة من بين الحوافز الحمضية حسب مفهوم برونشتد أو لويس أو بمركبات يمكنها أن تؤدي إلى في أخر المطاف إلى كربوكاتيونات.

تفاعل حوامض برونشتد مع الاليفينات

إن الأحماض البوتونية القوية (AmH) مثل: HCl, H2SO4, HClO4, CCl3CO2H تنشطر بسهولة و تعطي بروتون (+)Hيثبت على جزيء الاليفين مما يكون كربوكاتيون كما في المعادلة التالية:

$$AmH \longrightarrow Am^{(-)} + H^{(+)}$$ (انشطار الحامض)

$$H^{(+)} + CH_2 = CH(A) \longrightarrow CH_3 - (A)HC^{(+)}$$ (تنشيط المونمر- البدء)

(مونمر منشط على شكل كربوكاتيون)

الكربوكاتيون هو جزيء يحتوي على درة كربون غير مشبعة وتحتوي على نقص الكتروني ممثل في الكترونين.

إن إضافة بروتون((+)H) للمونمر يكون سهلا عندما المجموعة المستبدلة (A) للمونمر تؤثر على الرابطة المزدوجة بقطبية سالبة على الطرف الغير مستبدل , في هذه الحالة نجد المونمرات التي تتبلمر بسهولة بالطريقة الكاتيونية كما هو الحال في الايزوبيوتين(isobutene) و الايثرات الفينيلية (CH2=CH-O-R) و مشتقات الستايرين التي تحمل في موقعها البارا(para) مستبدل R أو OR.

تفاعل حوامض لويس مع الاليفينات

إن حوامض لويس تحتوي على هالوجينات المعادن الموجودة في مجموعة (III) من الجدول الدوري للعناصر نذكر منها: BF3, AlCl3 الخ و المحتوية على المعادن التحويلية مثل: ZnCl2, SnCl4, TiCl4, SbCl5 الخ.

$$MeX_n + SH \longrightarrow MeX_nSH \longrightarrow MeX_nS^{(-)} + H^{(+)}$$

في غالب الأحيان هذه المركبات في حالة نقاوة تامة وغير مميئة(anhydre) تعتبر حوافز غير فعالة و تصبح فعالة بمصاحبتها لمساعدات الحوافز (co-catalyst) مثل HX, H2O, R-OH كما تبينه المعادلات التالية:

Me : معدن تحويلي

و $BF_3 + HF \longrightarrow BF_4H \longrightarrow BF_4^{(-)} + H(+)$

$$AlCl_3 + H_2O \longrightarrow AlCl_3OH_2 \longrightarrow AlCl_3OH^{(-)} + H^{(+)}$$ و

المركبات التي يمكنها أن توفير كربوكاتيونات

عندما الحافز يكون هالوجنيور الالكويل (Alcoyle Halogenure) آو الايثر(ether)

فان آلية الحفز تصبح مختلفة قليلا عن السابقة كما توضحه المعادلة التالية:

$$BF_3 + [C_2H_5]_2O \longrightarrow BF_3,[C_2H_5]_2O \longrightarrow BF_3OC_2H_5^{(-)} + C_2H_5^{(+)}$$

و منه:

$$C_2H_5^{(+)} + CH_2 = CH(A) \longrightarrow C_2H_5 - CH_2 - (A)HC^{(+)}$$

النمو

هذه المرحلة تشبه إلى حد بعيد التي خطتها البلمرة الانيونية و فيه النمو الكاتيوني يتم بإدخال جزيئات الموغر الواحد تلوى الأخر بين الكربوكاتيون المكون و الايون المرافق له.

إذا كان التفاعل يتم باستخدام الحامض AmH يمكن تمثيل هذه المرحلة كالتالي:

$$H-CH_2-(A)HC^{(+)},Am^{(-)}+CH_2=CH(A)\rightarrow H-CH_2-CH(A)-CH_2-(A)HC^{(+)},Am^{(-)}$$

داي مير منشط   مونمر منشط

(Dimer actived)   (monomer active)

و ليكن:

$$H-M^{(+)}...Am^{(-)}+M\longrightarrow H-M-M^{(+)}...Am^{(-)}$$

و

$$H-M_i-M^{(+)}...Am^{(-)}+M\longrightarrow M-M_{i+1}-M^{(+)}...Am^{(-)}$$

مرحلة النمو تتأثر بطبيعة الحافز (AmH) و بطبيعة المذيب المستعمل في البلمرة أو بعبارة أخرى تتأثر بقوة الشد بين الزوج ألايوني الموجود في كل سلسلة من البوليمر (+)M---….Am(-),

النهاية

تشبه كذلك التي تمر بها البلمرة الانيونية إلا في حالات شاذة لا نتطرق لها في هذا المقرر.

البلمرة التناسقية (Coordination polymerization)

نسمي بلمرة ايونية تناسقية عندما مساعد الايون أو الايون المعوض يوجه البنية الهندسية (Stereochemie) للتفاعل بتناسقه مع مواقع موجودة في الموىمر أو في التسلسل المكون.

في هذا المقرر نكفي فقط بإعطاء بعض المعلومات على البلمرة التناسقية المحفزة بحوافز زايكلر- ناتا(Ziegler-Natta).

البلمرة بحوافز زيكلر – ناتا (Ziegler-Natta polymerization)

نجمع تحت تسمية حوافز زيكلر- ناتا كل الأنظمة المحفزة الثنائية المعدن التي تجمع: مركب عضو معدني (organometallic) أو هايدرور معدن (metalhydrure) ينتمي إلى مجموعات I و II و III من عناصر الجدول الدوري و الأكثر فعالية التي تنتمي إلى المجموعة III و خاصة منها الألمنيوم مثل:

هايدرور الالمنيوم AlH_3

ثلاثي كلور الاليمنيوم$AlCl_3$

ثلاثي الكويل المنيومAlR_3

احادي الكلورو داي المنيوم$AlClR_2$

و مشتق معدن تحويلي ينتمي إلى المجموعات IV و V و VI نذكر منها:

التيتان (Titane) على أشكال: $Ti(4+)$ و $Ti(3+)$ و $Ti(2+)$

الفناديوم (Vanadium)على أشكال: $V(5+)$ و $VO(3+)$ و $V(4+)$ و $VO(2+)$

الموليبدن(Molybdane) على شكل: $Mo(5+)$

التانكستن(Tungesten) على الشكل: $W(6+)$

الكروم (Crome) على أشكال: $Cr(6+)$ و $Cr(3+)$

هذا المشتق يمكن أن يكون اسيتايلاسيتونات(acetylacetonate) أو سايكلو بنتادainيل(cyclopentadienyl) أو الكولات(alcolate).

نظرا لكثير من العوامل إن آلية بلمرة زيكلر- ناتا معقدة في مجملها.

ظروف البلمرة

يمكن تقسيم ظروف البلمرة إلى نوعين أساسيين:

البلمرة المتجانسة(homogenous polymerization)

البلمرة الغير متجانسة (heterogenous polymerization)

3 - تقنيات البلمرة

3-1. البلمرة المتجانسة

تتم البلمرة المتجانسة في وسط متجانس سائل أو صلب أو غاز و هذا النوع يقتصر عادة فقط في العمل على مستوى المختبرات نظرا لصعوبة سير العملية و استخلاص البوليمر الناتج.

تشمل البلمرة المتجانسة البلمرة الكتلية و بلمرة المحاليل:

البلمرة الكتلية(Bulk polymerization)

يتم هذا التفاعل بوجود المونمر و الحافز فقط على شكل محلول وتجري البلمرة في ظروف مناسبة كدرجة الحرارة و الضغط و نقاوة المونمر حسب نوعية الحافز المستعمل في البلمرة . يتميز هذا النوع من البلمرة بالارتفاع الشديد في اللزوجة مما يعرقل حركية البلمرة في الوصول إلى مردود أعلى. هذه التقنية غير مرغوب فيها على المستوى الصناعي رغم استغنائها الكلي عن المذيب و ذلك لعدم التحكم في درجة حرارة التفاعل و صعوبة عملية استخلاص البولمر الناتج بعد التفاعل من الوسط التفاعلي العالي اللزوجة وتنظيف المفاعلات بعد العملية.

بلمرة المحاليل(Solution polymerization)

خلافا للبلمرة الكتلية إن البلمرة في وسط المحلول تتم بوجود المذيب و تتميز بحركية أبطاء من الكتلية و لكنها تؤدي في نهاية المطاف إلى مردود أعلى. في هذا النوع من البلمرة اللزوجة تكون متوسطة مما تسهل في التحريك و التحكم في درجة حرارة الوسط التفاعلي و تعتبر هذه الطرقة مفضلة عندما يراد تحظير البوليمرات بشكل محاليل حيث لا حاجة للتخلص من المذيب مثل ذلك بعض البوليمرات المستخدمة في صناعة الأصباغ و اللواصق و مواد الطلاء أو تحويلها إلى بوليمرات أخرى كالبولي فاينيل اسيتيت(polyvinyl acetate) إلى بولي فاينيل الكحول (polyvinyl alcohol)

3-2. البلمرة الغير متجانسة:

تتميز هذه البلمرة في العمل في أوساط تحتوي على أكثر من طور.

مثل:

- الموئمر غازي والحافز صلب و المذيب سائل,
- الموئمر سائل و المذيب لا يتجانس مع الموئمر و الحافز صلب,
- الموئمر سائل و المذيب لا يتجانس مع الموئمر و الحافز سائل.

و أهم أنواع هذه التقنيات نذكر منها:

البلمرة في المستحلبات(Emulsion polymerization)

هذا النوع من البلمرة يجري في وسط مستحلب مكون من سائل العضوي عادة ما يكون المونمر و ماء و حافز يذوب في المونمر و يضاف إلى هذا الخليط الغير متجانس كمية قليلة من الصابون (surfactant) بحيث المستحلب المكون يكون غنيا بالماء.

تفاعل البلمرة يتم في دخل الجسيمات الغروية(micelles) المحتوية على المونمر و الحافز, أما الماء الموجود بكثرة في الخليط يحيط بهذه الجسيمات و يكون مرسب للبوليمر بعد تكوينه كما هو موضح في الأشكال التالية :

جزيئات الماء

المونمر

+ الحافز

تستخدم هذه التقنية في تحضير العديد من البوليمرات الفينيلية (vinylic polymers) على المستوى الصناعي بواسطة الجذور الحرة كالبولي ستارين (polystyrene) و البولي كلورايد الفاينيل (polyvinylchloride) و المطاط الصناعي المكون من البوليمر المشترك ستارين- بيوتادين (copolymer(styrene-butadiene), الخ.

البلمرة في العوالق(Suspension polymerization)

هذا النوع من تقنيات البلمرة يكون فيه الوسط التفاعلي مكون من الماء بكثرة و المونمر منتشر فيه على هيئة قطيرات (dropleters) متعلقة في الوسط التفاعلي. أما البوليمر المتكون يشكل طور صلب غير ذائب في الوسط المائي نظرا لكثافته العلية بالنسبة للوسط الموجود فيه فيترسب على أشكال مختلفة بودرا (Powder) أو حبيبات أو قطع صغيرة الخ.

تستعمل هذه التقنية كذلك على المستوى الصناعي حيث يتم بها تحضير العديد من البوليمرات الفاينيلية بواسطة الجذور الحرة مثل البولي (ستايرين) و البولي (مثيل ميثا كريليت)(polymethylmethacrylate) و البولي (كلوريد الفاينيل)(polyvinylchloride) و البولي (كلوريد الفاينيلين) (polyvinylidenechloride) و البولي (اكريلونتريل) (polyacrylonitrile).

4- بلمرة التكثيف (Condensation polymerization)

تعتمد بلمرة التكثيف على مونمرات تحتوي على الأقل على مجموعتين وظيفيتين(two functional) (groups).

في البوليمرات الخطية المونمرات التي تدخل في تركيبها تحتوي على مجموعتين وظيفيتين مثل:

HO-Si(CH3)2-OH , H2N-(CH2)4-NH2 , H2N-CH(CH3)-OH , HO-C(CO)-CH2-CH2-C(CO)-OH , الخ.

أما البوليمرات المتشابكة تحضر من المونمرات ذات ثلاثة مجموعات وظيفية أو أكثر مثل:

HO-Si(CH3)OH-OH , H2N- CH2-CH(NH2)-CH2-NH2 , HO-CH2-CH(NH2)-CH2-CO-OH , Cl-Si(OH)2-Cl

آلية بلمرة التكثيف :

يتم في بلمرة التكثيف ترابط جزيئات المونمر مع بعضها لبعض شيء فشيء مع حذف جزيئات صغيرة كجزيئات الماء لتكوين سلاسل بوملرية قصيرة (oligomers) مكونة من اثنين أو ثلاثة وحدات مونمرية أو أكثر قليلا أي أن المونمر يختفي مند المراحل الأولى من التفاعل ثم ترتبط هذه السلاسل القصيرة مع بعضها لتكوين سلاسل أطول فأطول و في نهاية المطاف نتحصل على بوليمرات ذات أوزان جزيئية عالية. الشكل التالي يوضح هذه الآلية:

مثال 1:

HO-Si(CH3)2-OH + HO-Si(CH3)2-OH ⟶ HO-Si(CH3)2-O – Si(CH3)2-OH +H2O

HO-Si(CH3)2-O –Si(CH3)2-OH + HO-Si(CH3)2-O –Si(CH3)2-OH⟶ HO-[Si(CH3)2-O -]3-OH +H2O

الخ.

مثال 2:

H2N-(CH2)3-OH + H2N-(CH2)3-OH ⟶ H2N-(CH2)3- HN-(CH2)3-OH + H2O

H2N-(CH2)3- HN-(CH2)3-OH + H2N-(CH2)3- HN-(CH2)3-OH⟶H2N-[-(CH2)3-HN-]3-

الجدول التالي يبين بعض البوليمرات المحضرة بالتكثيف من المونمرات المناسبة لها.

البوليمر	الصيغة الكيميائية	المونمر
بولي(استر) Polyester	HO-[-CO-CH2-CH(COOR')-O-]n-H	HO-CO-CH2-CCOOR'-OH
بولي(كربونات) Polycarbonate	-[-RO-CO-O-]n-R	RO-CO-OR
بولي(امايد) Polyamide	H-[-NH-R-NH-CO-R'-CCO-]n-OH	H2N-R-NH-CO-R'-CCO-OH
بولي(ايثر) Polyether	-[-(CH2)p-O-]n-	HO-(CH)p-OH
بولي(يوريا) Polyurea	-[-CO-NH-]n-	NH2-CO-NH2
بولي(سايلوكسان) Polysiloxane	HO-[-Si(R)2-O-]n-	HO- Si(R)2-OH
بولي(يوريثان) Polyurethane	H-[-O-CH2-O-CO-NH-(CH2)p-]n-NCO	HO-CH2-O-CO-NH-(CH2)p-NCO

4- الأوزان الجزيئية للبوليمرات

إن مفهوم الأوزان الجزيئية للبوليمرات يختلف عن الأوزان الجزيئية للمركبات الأخرى لان سلاسل البوليمر تتباين في أطوالها لهذا السبب يعنى بالوزن الجزيئي للبوليمرات عادة معدل الأوزان الجزيئية (Average molecular weights) و ليس الأوزان الجزيئية المطلقة.

هناك أكثر من نوع من الأوزان الجزيئية للبوليمرات نذكر منها:

متوسط الوزن الجزيئي العددي

(Number Average molecular weight)

يرمز له ب $\overline{\mathrm{M}}\mathrm{n}$ و هذا النوع من الوزن الجزيئي يعتمد على عدد سلاسل البوليمر في العينة المراد تحليلها و يتم تحديدها بالعلاقة التالية:

$$\overline{\mathrm{M}}\mathrm{n} = \frac{\sum \mathrm{N_i} \times \mathrm{M_i}}{\sum \mathrm{N_i}}$$

حيث ان Ni و Mi يرمزان على التوالي إلى عدد السلاسل البوليمرية (i) و الوزن الجزيئي لها.

متوسط الوزن الجزيئي الوزني(weight average molecular weight) و يرمز له ب $\overline{\mathrm{M}}\mathrm{w}$ و يستند إلى إيجاد هدا الوزن إلى كتل السلاسل البوليمرية المراد معرفة وزنها الجزيئي و يتم تحديدها بالعلاقة التالية:

$$\overline{M}w = \frac{\sum N_i \times M_i^2}{\sum N_i \times M_i}$$

متوسط الوزن الجزيئي ألزوجي(Viscosimetric average molecular weight)

$\overline{M}v$ و هذا النوع من الأوزان الجزيئية يعتمد في قياسه على لزوجة محلول يحتوي البوليمر المراد معرفة وزنه الجزيئي و يتم تحديدها بالعلاقة التالية:

$$\overline{M}v = \left[\frac{\sum Ni \times M_i^{a+1}}{\sum Ni \times Mi}\right]^a$$

حيث أن a هو ثابت تتراوح قيمته بين 0.5 و 0.9 و عندما تصبح $a = 1$ فيصبح عندئذ متوسط الوزن الجزيئي ألزوجي $\overline{M}v$ مساويا متوسط الوزن الجزيئي ألوزني $\overline{M}w$.

و لذلك يكون معدل الوزن الجزيئي اللوزوجي دائما اقل أو مساويا لمعدل الوزن الجزيئي ألوزني و ليس أعلى منه و تتدرج القيم الثلاثة للأوزان الجزيئية كالتالي:

$$\overline{M}w > \overline{M}v > \overline{M}n$$

النسبة $\frac{\overline{M}w}{\overline{M}n}$ تسمى بنسبة توزيع الأوزان الجزيئية (molecular distribution weightو يرمز لها بحرف) I(و تعني كذلك معامل تعدد الجزيئات (Polydispersity index)

عندما قيمة (I) تقترب من الواحد نقول بان البوليمر آحادي الجزيئات (monodisperse) يعني هذا بان جزيئاته لها تقريبا نفس الطول و نفس الوزن بينما إذا كانت هذه القيمة تبتعد عن الواحد فالبوليمر يكون متعدد الجزيئات) (polydisperse أي أن جزيئاته مختلفة في الطول و الوزن.

5. طرق إيجاد الأوزان الجزيئية للبوليمرات

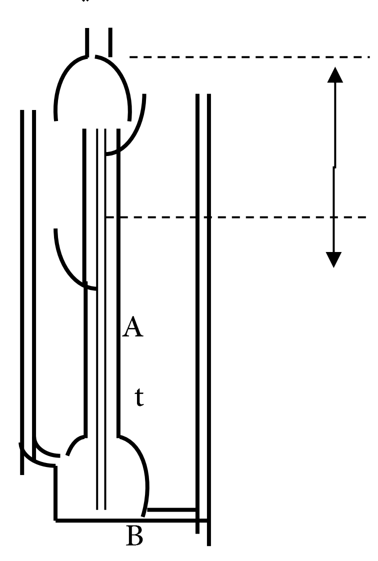
لإيجاد الأوزان الجزيئية للبوليمرات هناك عدة طرق تعتمد جميع هده التقنيات على بعض خواص البوليمرات . و قد صممت العديد من الأجهزة التي تعتمد على قياس تغيير هده الخواص مع الوزن الجزيئي للبوليمر. من هذه الأجهزة من هو مفيد لقياس الأوزان الجزيئية العالية و منه ما هو مفيد لقياس الأوزان الجزيئية المنخفضة و على هدا الأساس يجب اختيار الطريقة المناسبة. في هدا الجزء نعد فقط البعض من هده الطرق المستعملة بكثرة في المختبرات المتخصصة.

1-5. تعيين معدل الأوزان الجزيئية بطريقة قياس اللزوجة

يعتبر تعيين الوزن الجزيئي للبوليمرات بواسطة قياس اللزوجة من الطرق المألوفة في المختبرات و ذلك لسهولة و بساطة الأجهزة المستعملة . أن محاليل البوليمرات تتميز بصفة فريدة تختلف عن محاليل المواد الأخرى بكونها أكثر لزوجة و أن هذه اللزوجة تعتمد على الوزن الجزيئي للبوليمر المذاب و تركيزه في المحلول

و درجة الحرارة و نوعية البوليمر و بنيته الكيميائية و الهندسية و طبيعة المذيب الخ.

و تقاس لزوجة محلول مكون من بوليمر و مذيب اعتماد على أنبوب شعري يسمى بأنبوب يوبلأهد (Ubelohde tube) و شكله كالتالي:



يتم في هذا الجهاز قياس زمن انسياب المذيب المستخدم في تكوين المحلول البوليمري و ليكن (to) ثم قياس زمن انسياب المحلول نفسه و ليكن (t) وهذا الزمن يعبر عن الزمن المستغرق لمرور كمية معينة من المحلول عبر الأنبوب و الزمن المستغرق لنفس الكمية من المذيب في نفس درجة الحرارة. عبر هذه القياسات يمكن حساب الزوجة كالتالي:

اللزوجة النسبية (Relative viscosity)

$$\eta_{rel} = \frac{t - t_o}{t_0}$$

اللزوجة المختزلة (Reduced viscosity)

$$\eta_{red} = \frac{t - t_0}{C \times t_0}$$ أي أن $$\eta_{red} = \frac{\eta_{rel}}{C}$$

C : تركيز المحلول

و من هذه العلاقة يمكن معرفة اللوزوجة الجوهرية كالتالي :

اللزوجة الجوهرية (Intrinsic viscosity)

$$[\eta] = (\frac{t - t_0}{C \times t_0})_{C \to 0}$$ أي أن $$[\eta] = (\eta_{red})_{c \to 0}$$

لتحديد الوزن الجزيئي $\overline{Mv}$ يستلزم تحضير عدة محاليل ذات تراكيز مختلفة C1 و C2 و C3

و C4 الخ ثم رسم المنحنى البياني (η_{red}) بدلالة التركيز Ci ثم تمديد الخط حتى

$Ci = 0$

و من اللزوجة الجوهرية [η] نستطيع إيجاد متوسط الوزن الجزيئي اللزوجي $\overline{M}v$

بتطبيق علاقة مارك هوفينك (Mark Houwink) كالتالي:

$$[\eta] = K \times \overline{M}_V^a$$

و منه : $$\overline{M}_V = e^{\left(\frac{\ln[\eta] - \ln k}{a}\right)}$$

K و a هي ثوابت تعتمد على نوع البوليمر و المذيب المستعمل و درجة الحرارة المحلول.

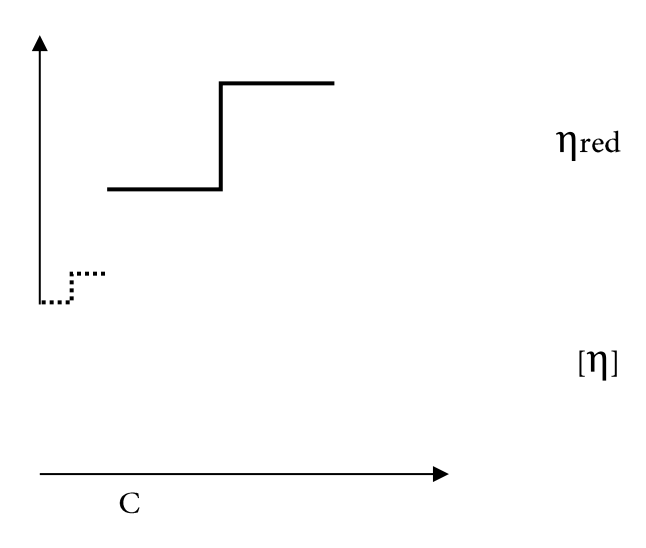
مثال:

ما هو الوزن الجزيئي ألزوجي للبولي ستارين علما بان نتائج قياس اللزوجة المختزلة بدلالة تركيز البوليمر في المذيب كانت كالتالي:

Red(dl/g)η	1.02	0.92	0.87	0.823
C(g/dl)	0.2	0.1	0.05	0.0025

و ثوابت اللزوجة للمحلول k و a عند درجة حرارة القياس 30oC: 5-10 و 0.72 .

الحل:



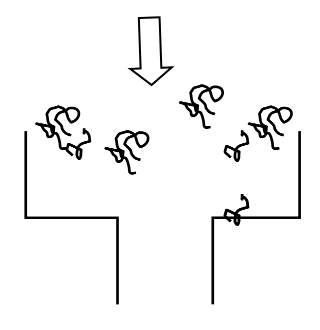
الرسم البياني redη بدلالة التركيز C مع تمديد الخط عند C=0 أدى إلى [η] = 0.82 dl/g

5 -2. تعيين معدل الوزن الجزيئي

باستعمال طريقة الكروماتوغرافيا الفصل بالحجم

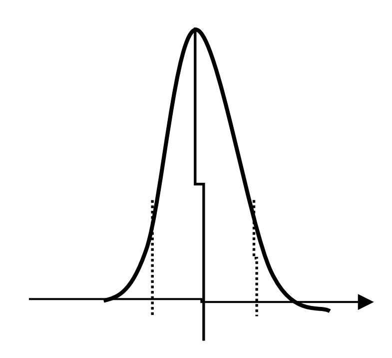
SEC (Exclusion by size chromatography)

تسمى كذلك هده الطريقة بالكروماتوغرافيا باستعمال الهلام النافد (gel permeation Chromatography) و تعتمد على عمود كروماتوغرافي مختلف عن التي يستعمل في الفصل التقليدي للمواد العضوية حيث الأعمدة فيها تتعبا ببوليمرمتشابك (polymer cross-linked) يحتوي على مسامات عادة ما يكون هدا البوليمر بولي ستارين و يتم الفصل ابتداء من الجزيئات الكبيرة ثم المتوسطة ثم الصغيرة عكس آلية الكروماتوغرافيا العادية التي أعمدتها تحتوي على داعم مغطى بطور ثابت مكون من بوليمر قطبي أو غير قطبي حسب المواد المراد فصلها و فيها الجزيئات تفصل حسب قطبيتها و الصغيرة تفصل أولا ثم المتوسطة فالكبيرة.



استثمار المعلومات من الجهاز:

بعد حقن المحلول المحتوي على عينة البوليمر المراد تعيين وزنه الجزيئي هدا الاخير يسلك المسار الموضح في الشكل أعلاه حتى يظهر على شاشة الكمبيوتر ما يلي:



Mn

Vl : حجم الدافع (Elution volume)

Vl = D x tr

D : التدفق (min /ml) Ma Mb (Flux)

tr: زمن استغراق العينة في العمود (retention time)

Vl الأوزان الجزيئية العالية:Ma

: الأوزان الجزيئية الواطئة Mb

لقياس متوسط الوزن الجزيئي العددي لبوليمر ما نعتمد على عينة ذات وزن جزيئي معروف (عينة قياسية) $\overline{M}n_s$ (standard sample) و يتم إذابتها في المذيب ثم حقنها في نفس ظروف العينة المراد معرفة وزنها الجزيئي و لتكن كمية الدافع اللزمة لخروجه هي Vs فمتوسط الوزن الجزيئي العددي للعينة يحسب كالتالي:

$$\overline{M}n = Mn_s \times \frac{V_s}{V_l}$$

مثال:

ما هو الوزن الجزيئي لعينة من البولي فينايل الكحول حجم الدافع في GPC كان 25 ml و12.5 ml عند مرور عينة قياسية متوسط وزنها الجزيئي يساوي106 2.3 غرام لكل مول.

الحل:

$$\overline{M}n = 2.310^6 \times \frac{25}{12.5} = 4.6106$$

5 -3. تعيين الأوزان الجزيئية باستعمال طريقة الضغط الاسموزي

يعتمد تعيين الوزن الجزيئي للبوليمر من قياسات الضغط الاسموزي الغشائي على تغير الضغط الاسموزي مع التركيز المولالي لمحلول البوليمر كما هو مبين في المعادلة التالية و التي تدعى بمعادلة فانت- هوف (Van't-Hoff) :

$$\frac{\pi}{C} = \frac{R \times T}{\overline{M}n}$$

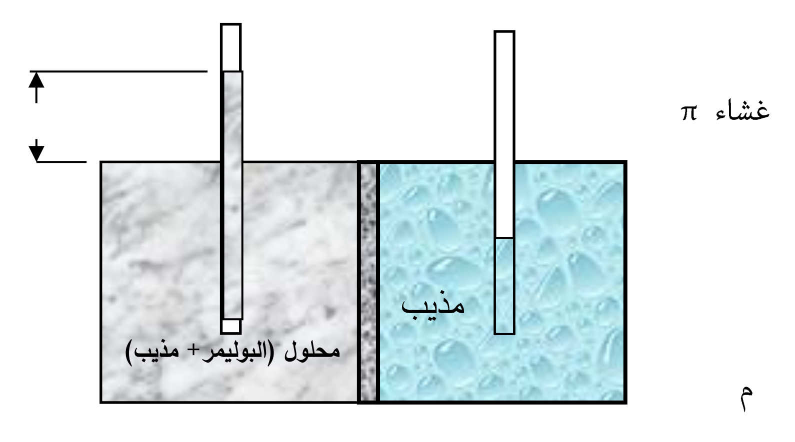
حيث أن:

π: تمثل الضغط الاسموزي.

C : التركيز المولالي للبوليمر في المحلول.

R : ثابت الغازات　　　　　　　T : درجة حرارة العمل

نموذج لجهاز قياس الضغط الاسموزي



الأغشية المستعملة في هذه التقنية هي مصنوعة من مادة بوليمرية يسمح من خلالها مرور المذيب دون جزيئات البوليمر المراد معرفة وزنه الجزيئي semipermeable (membrane) و لهذا السبب هده التقنية تكون مجدية فقط لقياس الأوزان الجزيئية العالية أي أكثر من 25000.

من بين الأغشية المستعملة في هذه الطريقة نذكر:

البولي فاينل الكحول ((Poly(vinyl alcohol)

البولي ايزوبيوتيرال ((Poly(isobutyral)

السيلوفان (Cellophane)

الأغشية البكتيرية (Bacterial membranes)

الأغشية الغروية (Collodian membranes)

من بين ظروف استعمال هذه الأغشية هي عدم تناظرها و يقصد بذلك عدم تجانس مستوى السائل على جانبي الغشاء و يعود ذلك إلى أسباب تتعلق بكيفية تحضير الأغشية.

و يتم تعيين الأوزان الجزيئية العددية من رسم العلاقة بين Cπ/ مع التركيز C . فعند التخفيف إلا نهائي C = 0 تكون Cπ/ مساوية K/Mn حيث أن k هو ثابت المعايرة. C

4-5. تعيين معدل الاوزان الجزيئية للبوليمرات بطريقة تشتت الضوء

(Light scattering)

تتسم هذه الطريقة بسهولتها و عدم الحاجة إلى وقت طويل للقياسات, يمكن بواسطتها تعيين متوسط الوزن الجزيئي ألوزني المطلق و تعيين أبعاد الجزيئات البوليمرية مثل المسافة بين نهايتي السلسلة البوملرية و نصف قطر الكرة البوملرية و يمكن بواسطتها إيجاد معامل الانتشار للبوليمر (polydispersity index). يمكن كذلك بواسطتها إيجاد أوزان جزيئية تتراوح بين 103 لغاية بضعة ملايين و بدقة مقبولة. ......

مشاكل هده الطريقة تكمن في نظافة المحلول البوليمري الذي يجب أن يكون خاليا تماما من الشوائب لان اصغر درة غبار تكون اكبر من آية جزيئه بوليمر لذلك يجب استخدام معدات خاصة لترشيح المحاليل و تنقيتها من آية دقائق عالقة. من ناحية أخرى يجب أن يكون هناك اختلاف ملموس بين معامل انكسار المذيب و البوليمر المذاب و أن هدا الاختلاف هو الذي يحدد إلى أي مدى من الوزن الجزيئي الواطئ يمكن تعيينه بهده الطريقة فكلما ازداد الاختلاف كلما أمكن تعيين وزن جزيء اوطاء.

المبداء Principe :

إن قياس الوزن الجزيئي بواسطة تشتت الضوء يعتمد على تشتت جزء من الضوء الساقط على محلول البوليمر أثناء اختراقه للمحلول و يعود سبب تشتت الضوء إلى عدم تجانس محلول البوليمر بسبب الحركة الحرارية لجزيئات البوليمر في المحلول. عليه, فيكون هناك باستمرار تغير في الكثافة الموقعية أو التركيز ألموقعي للمحلول مما يؤدي إلى تغير معامل الانكسار و الذي يؤدي بالنتيجة إلى تشتت الضوء. لقد طورت نظرية خاصة بتشتت الضوء لمحاليل البوليمرات من قبل دباي (Debye)لا يسع المجال في هدا المقرر إلى التطرق إلى تفاصيل و اشتقاقات هده النظرية.

و باختصار شديد يمكن أن نكتب العلاقة التي تؤدي إلى قياس متوسط الأوزان الجزيئية كالتالي:

$$\frac{H_c}{R_{90}} = \frac{1}{\overline{Mw}} + 2\frac{A_2}{R \times T}C$$

حيث أن:

$$H_c = \frac{2\pi^2 \times n_0^2 (dn/dc)^2}{N_A \times \lambda^4}$$

Hc : هو ثابت التناسب يعتمد على تغير معامل الانكسار n مع التركيز C.

n و n0 هما على التوالي معامل الانكسار للمذيب و المحلول البوليمري

dn/dc : التغير في معامل الانكسار للمحلول بالنسبة للتغير في التركيز.

NA: عدد افوكادرو (Avogadro)

λ: طول موجة الضوء

R90: تغير شدة تشتت الضوء عند زاوية 90 درجة المعروفة باسم نسبة رايلي (Rayleight ratio)

A2: معامل فيريل يعتمد على التفاعلات البينية الموجودة بين البوليمر وجزيئات المذيب.

فعند التراكيز المخففة نرسم العلاقة بين Hc/R90 و التركيز C فنصل على خط مستقيم مقطعه الصادي يمثل مقلوب الوزن الجزيئي Mw.

5-5. تعيين متوسط الأوزان الجزيئية بتعديل المجاميع الوظيفية في نهاية السلسلة البوليمرية:

هذه الطريقة تكون فعالة فقط في حالة الأوزان الجزيئية الواطئة ويتم هذا بعدة طرق حسب نوع المجموعة الوظيفية.

إذا كانت هذه المجاميع حوامض أو قواعد فتعدل بالقواعدأو بالحوامض فعدد مولات القاعدة أو الحامض ألازم لتعديل هذه المجاميع في العينة يكون مساويا لعدد مولات السلاسل الموجودة فيها وبقسمة كمية العينة على عدد السلاسل نحصل على الوزن الجزيئي للبوليمر.

نستطيع كذلك أن نعين الوزن الجزيئي للبوليمرات باستعمال RMN و ذلك بتحديد مساحة البيك المناسب لأحد البروتونات أو لأحد الكربون المكون للمجموعة الوظيفية في نهاية السلسلة و المختلفة بالنسبة لوحدات المونمرية المكونة للسلسلة. بقسمته مع ما يمثله من مساحة احد البروتونات أو احد الكربونات في الوحدة المونمرية و الناتج يساوي عدد المونمرات المكونة لكل سلسلة بولمرية. فضرب هذا العدد في الوزن الجزيئي للمونمر يؤدي إلى متوسط الوزن الجزيئي للبوليمر.

البوليمرات:-

وهي جزيئات كبيرة اصلها لاتيني متكون من مقطعين هما poly (متعدد) و mer (وحدة) الوحدة البنائية للبوليمر (الجزيئة الكبيرة) تسمى monomer . فمثلاً الكلوكوز هو الوحدة البنائية للسيلسلوز ولكن يترتب السيلليلوز بترتيب اخر نحصل كلايكوجين او نشأ.

للبوليمرات أهمية يومية وليست صناعية فقط فهي تدخل في حياتنا اليومية لكونها تكون الجزء الاساسي من البروتينات والنشويات و DNA , RNA.

يعتمد الوزن الجزيئي للبوليمرات على عدد الوحدات المكونة لذلك البوليمر ويرمز لها ب (n) كذلك يرمز لها (DP) معناها Degree of polymerization أي درجة البلمرة :- بذلك يصبح الوزن الجزيئي يساوي عدد الوحدات X الوزن الجزيئي للوحدة الواحدة.

m.wt of polymer = m.wt of monomer x n

= m.wt of monomer x DP

لم تكن البوليمرات معروفة قبل عام 1880م. تم تصنيفها من قبل العالمان راوت وفاندهوف بعد اجراء تجاربهم على المطاط الطبيعي وجدوا ان الوزن الجزيئي للمطاط 40000-10000.

عام 1900 ظهرت الاجهزة وتطور العلم وصنفت بأنها مواد غروية.

عام 1928 استطاع العالمان مارك ومايد ايجاد التركيب الفراغي للمطاط الطبيعي.

عام 1930 اكتشف الباحث كاروتيس النايلون من تفاعلات بسيطة.

عام 1931 تم تصنيع البولي استر

عام 1937 تم اكتشاف البولي اثيلين.

عام 1938 تم صناعة التفلون (Tetra fluoro ethylene) هو مادة بيضاء لاتذوب في الماء والمذيبات.

تسمية البوليمرات:-

لا تختلف تسمية البوليمرات من حيث المبدأ عن تسمية المركبات العضوية واللاعضوية الا بفارق بسيط هو وضع كلمة متعدد (poly) قبل اسم الموثمر في حالة البوليمرات المنفردة وكلمة متعدد مشترك (co-poly) في حالة البوليمرات المشتركة.

لا تتاثر هذه القاعدة اذا استخدمت التسمية العامة حسب مصدر المونمروحسب نظام IUPAC فمثلاً يسمى المركب ستايرين

Poly-(1-phenyl ethylene)

كذلك توجد تسميات تجارية لا تحكمها قاعدة فمثلاً يوجد للبولي اثيلين اثناعشر اسماً تجارياً منها.

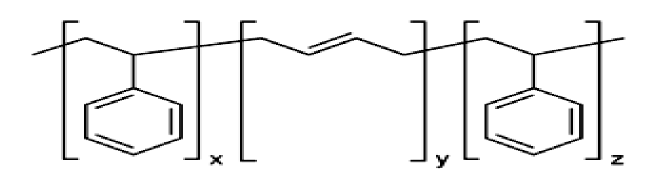
Althon > doped

Marlex> phillips

Dylan > Aramco

كذلك البوليمر المتكون من مونمرين مثل الستايرين والبيوتادايين يسمى.

Poly-(styrene-co-butadiene)



أذا كان المركب من ثلاث وحدات مختلفة مثل الستايرين, بيوتادايين, واكريلو نترايل فيسمى Poly-(styrene-co-Butadiene-co-Acrylonitril)

أذا كان البوليمر من وحدتين متناوبتين تكون التسمية.

Poly-(ethylene-Alt-carbon monoxide)

$$-\overset{H_2}{C}-\overset{H_2}{C}-\overset{\overset{O}{\|}}{C}-\overset{H_2}{C}-\overset{H_2}{C}-\overset{\overset{O}{\|}}{C}-$$

تصنيف البوليمرات:-

تصنف البوليمرات بعد الاخذ بنظر الاعتبار مصادرها, هيكلها البلوري والبنائي وكذلك تركيب الجزيئية العملاقة.

وأشهر اصناف البوليمرات يعتمد على:-

أ- من حيث المصادر:-

تقسم الى قسمين هما:-

1-بوليمرات طبيعية Natural polymer :-

مصدرها يكون نباتي كالسيلليوز والاصماغ والحرير الطبيعي و المطاط ومنها ذو مصدر حيواني كالصوف والجلود والشعر.

2-بوليمرات مصنعة Synthesis polymer:-

أصبحت كثيرة ومتنوعة مثل poly styrene, poly propylene, poly vinyl chloride

ب - من حيث الهيكل البنائي للجزيئة :-

تقسم الى ثلاثة اقسام:-

1-بوليمرات [illegible] Liner p[illegible]

في هذا النوع [illegible] monome[illegible]) بعضها ببعض وبصورة مستمرة بحيث لا يؤدي ذلك الى تكوين فروع جانبية بالسلسلة وأهم هذه المركبات هو متعدد الاثيلين عالي الكثافة [High density poly ethylene] (HDPE) ويكون متبلور.

2-البوليمرات المتفرعة:- Branched polymers

في هذا النوع يكون ارتباط الوحدات البنائية بعضها ببعض مكوناً فروع جانبية في السلسلة البوليمرية منها:

polystyrene , polyvinyl chloride

Cata1yst

styrene | Polystyrene (Styrofoam)

Cata1yst

Viny1 chloride | Polyviny1 chloride (PYC)

Cata1yst

Methy1 methacrylate (MMA) | PMMA (Plexiglas, Lucite)

3-البوليمرات المتشابكة :- Cross linked polymer

في هذا النوع ترتبط سلاسل بوليمرية بعضها ببعض بسلاسل جانبية صغيرة مؤلفة من وحدات من نوع البوليمر او تكون غريبة عنه.

Poly (Benzimidazole-co-aniline) (PBIANI)

ج-من حيث تركيب الجزيئة:-

وتصنف الى قسمين:-

1-بوليمرات متجانسة :- Homo polymer

في هذا النوع تتالف جزيئة البوليمر من وحدات بنائية متكاملة وتكون جميعها من نفس الوحدة مثال عليها البولي اثيلين

$$\left(-\overset{\displaystyle H}{\underset{\displaystyle H}{\overset{|}{\underset{|}{C}}}} - \overset{\displaystyle H}{\underset{\displaystyle H}{\overset{|}{\underset{|}{C}}}} - \right)_n$$

2-البوليمرات المركبة:- Co-polymer

في هذه الحالة تحتوي الجزيئة الواحدة من البوليمر على وحدات بنائية مختلفة مثل Poly-(styrene-co-butadiene)

د- التصنيف التقني (المقاومة الحرارية):-

تصنف البوليمرات على حسب تحملها الحراري الى انواع مختلفة. لأجل هذا التصنيف تحدد بعض الدرجات الحرارية مثل درجة حرارة الانتقال الزجاجي (Tg) Glass transition temp. :- وتعرف بانها الدرجة الحرارية التي يتحول فيها البوليمر من الحالة الصلبة الى الحالة اللينة.

كذلك (Tf) Fluid Temp:- وتمثل درجة السيولة وتعرف على انها الدرجة الحرارية التي يتحول فيها الصلب او المرن الى الحالة السائلة.

كذلك (Tm)melting temp:- تسمى درجة الانصهار البلوري وهي الدرجة الحرارية التي تختفي عندها اخر التراكيب البلورية.